

MITSUBISHI DENKI GIHO 三菱電機技報

Vol.46 October 1972

研究開発特集

10

超電導磁気浮上動特性試験装置用軽量クライオスタット



未来を開発する



三菱電機



研究開発特集

目次

《特集論文》

- 超高速列車磁気浮上方式の研究……………大野栄一・岩本雅民・萩野 治・河村寿三・忍 正寿…1103
- オゾンによる染色排水処理……………前田満雄・橋本雄二郎・小沢建樹・今村 孝・松岡宏昌・田畑則一…1110
- レーザレーダによる排煙流の観測と SO₂ 濃度の測定……………中原昭次郎・伊東克能・伊東 尚…1116
- けい素鋼板の磁気ひずみの変圧器騒音への影響……………土屋英司・岡田 将・河上英典…1122
- 発電機端部の固定子巻線に働く電磁力……………野村達衛…1129
- プラズマディスプレイ……………倉橋浩一郎・鳥取 浩・磯貝文彦…1135
- 水晶腕時計用 CMOS IC……………大久保利美・中山光雄・坂根英生・安岡晶彦・堀場康孝・鍋谷 弘・富沢 孝…1140
- ZnO 薄膜超音波トランスジューサの試作……………戸村光一・大西 勝・吉沢達夫…1147
- GaAs 気相エピタキシャル結晶……………三木秀二郎・伊藤道弘・織田隆雄…1153
- 低真空形電子ビーム溶接機用プラズマ電子銃……………上山善司・安永政司・佐々木茂雄・田野正博…1158
- 省力化・自動化機器へのミニコンの導入……………藤原 智・壺井芳昭・弘中一光・正田茂男・丸山寿一・白石 彊…1163
- 電着絶縁方式 MEDIS の開発……………柴山恭一・佐藤文彦・小野 博・地大英毅…1171
- 塗装におけるリン酸塩処理の再評価……………島本幸三・駒沢吉郎・岩田義郎…1177

《普通論文》

- 大容量バーヒータ……………喜多村弘明・松尾 茂・豊田 烈…1187
- 金属材料の冷却水による腐食……………田辺 愈・市田行則・山本利雄・光本誠一・山内 敦・森 章文・川中・進…1190
- 絶縁油の低温における交流破壊電圧に及ぼす水分の影響……………上田 実・石井敏次…1201
- 電子計算機によるプリント配線板の完全自動化検査システム……………小島一男・田中千代治・上野靖彦・柳沢 寛・金田 一・松沼武夫…1205
- 原子吸光分析法の応用……………島田和彦・吉留昭男…1217

《新製品紹介》

ダイヤロール新シリーズ・もちつき機専用モータ

《ニュースフラッシュ》

36 kV 用限流形電力ヒューズの完成・地下鉄丸の内線 戸閉保安装置用 速度検出器・羽越, 白新線列車ダイヤ自動記録装置

《特許と新案》

開閉装置・電解加工装置・避雷器の特性低下度検出方法・マグネトロン の異常発振検出装置・位相変調装置・電子機器などの筐体支持装置・船舶用救難滑り台装置・電子機器などの筐体

《表紙》

表紙 1 超電導磁気浮上動特性試験装置用軽量クライオスタット

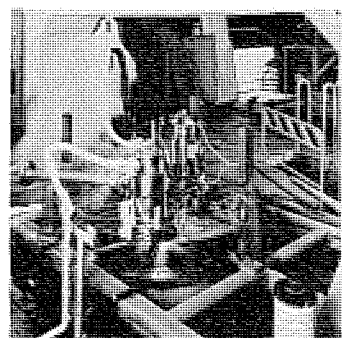
国鉄では急増する東海道地区の輸送需要に応ずるため、昭和55年完成を目標に時速 500 km/h の超高速鉄道の開発を進めている。この超高速鉄道には、リニアモータ推進と、超電導磁石による浮上・案内というまったく新しい技術の応用が考えられている。

写真の軽量クライオスタットは磁気浮上動特性試験装置として鉄道技術研究所に納入されたもので、軌道コイルに相当するコイルをもった円板が下部で回転すると、車体に相当するこのクライオスタットが浮上するもので、重量 695 kg の軽量化を行ない、浮上高さ 5 cm を実現し、超電導磁気浮上技術の前進に大きく貢献したものである。

表紙 2 三菱電子ビーム溶接機

表紙 3 三菱ダイアックス放電加工機シリーズ

表紙 4 三菱エレベット





SPECIAL EDITION FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT

CONTENTS

SPECIALLY COLLECTED PAPERS

Study on Magnetic Levitation for High Speed Trains	.....E. Ohno • M. Iwamoto • O. Ogino • T. Kawamura • M. Shinobu	1103
Ozone Treatment of Dyeing Wastewater	.....M. Maeda • Y. Hashimoto • T. Ozawa • T. Imamura • H. Matsuoka • N. Tabata	1110
Observation of Stack Effluent and Measurement of SO ₂ Concentration with Laser Radar	.....S. Nakahara • K. Ito • S. Ito	1116
Influence of Silicon Steel Sheets having Magnetostriction on Power Transformer Noise	.....H. Tsuchiya • M. Okada • H. Kawakami	1122
Magnetic Forces Working on End Windings of Generators	.....T. Nomura	1129
Plasma Display	.....K. Kurahashi • H. Tottori • F. Isogai	1135
CMOS IC for Quartz Wristwatches	.....T. Ohkubo • M. Nakayama • H. Sakane • A. Yasuoka • Y. Horiba • H. Nabetani • T. Tomisawa	1140
Trial Production of ZnO Thin Film Ultrasonic Transducers by a New Method of Film Formation	.....K. Tomura • M. Ohnishi • M. Yoshizawa	1147
GaAs Crystals Grown by Vapor Phase Epitaxy	.....H. Miki • M. Ito • T. Oda	1153
Plasma Electron Beam Guns for Use in Low Vacuum Electron Beam Welders	.....Y. Ueyama • S. Yasunaga • S. Sasaki • M. Tano	1158
Application of Mini-computers to Labor Saving and Automated Equipment	.....S. Hagihara • Y. Tsuboi • K. Hironaka • S. Masada • H. Maruyama • T. Shiraishi	1163
Development of Electro-deposition Insulating System "MEDIS"	.....K. Shibayama • F. Sato • H. Ono • E. Jidai	1171
Renewed Appraisal of Phosphate Treatments in Painting	.....K. Shimamoto • Y. Komazawa • Y. Iwata	1177

TECHNICAL PAPERS

Large Capacity Induction Bar Heaters	.....H. Kitamura • S. Matsuo • I. Toyoda	1187
Corrosion of Metals in Cooling Water	.....M. Tanabe • Y. Ichida • T. Yamamoto • S. Mitsumoto • A. Yamauchi • A. Mori • S. Kawanaka	1190
Effect of Moisture on AC Breakdown Voltage of Insulating Oil at Low Temperature	.....M. Ueda • T. Ishii	1201
Full Automatic Test System of Printed Circuit Boards with Digital Computer	.....K. Kojima • C. Tanaka • Y. Ueno • H. Yanagisawa • H. Kanada • T. Matsunuma	1205
Application of Atomic Absorption Spectrometry	.....K. Shimada • A. Yoshidome	1217

NEW PRODUCTS	1223
--------------	------

NEWS FLASH	1225
------------	------

PATENT AND UTILITY MODEL	1183
--------------------------	------

COVER :

Lightweight Klyostat for Dynamic Characteristic Testing Apparatus of Super-Conducting Electro Magnetic Levitation

A project is on foot for working out a superhigh speed train running at a speed of 500 km per hour by the Japanese National Railways with an aim of completing it in 1980 to meet the rapid increase of traffic demand in the Tokaido District. Entirely new technique is to be applied to the super high speed railway by employing linear motor propulsion and floating guides with super-conducting electro magnets.

Illustrated is a lightweight Klyostat delivered to the Railway Technical Laboratory as a testing apparatus of dynamic characteristics. The apparatus is so devised that when a disk having coils corresponding to track coils rotates underneath, the Klyostat playing the role of a car body floats. The apparatus is made to weigh as light as 695 kg and levitates to the height of 5 cm. This contributes to the advance of the levitation technique using super conducting magnets.

UDC 537.312.62:621.318.3:621.315.5

超高速列車磁気浮上方式の研究

大野栄一・岩本雅民・荻野 治・河村寿三・忍 正寿

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1103～1109

東海道新幹線の成功は、世界的に陸上での高速大量輸送機関としての鉄道の地位を再認識させるとともに、さらにより高い速度をめざした超高速鉄道の開発へと立ち立っている。超高速列車は、従来の方式のもつ粘着・集電・車輪支持という三つの制約から脱却し、リニアモータによる直接推進と、磁気力による案内支持を採用するものである。この磁気力の発生には、軽量で電力損失のない超電導磁石が最も適している。この論文では、このような超電導磁石を用いた磁気浮上列車の原理と方式について述べ、その実用化の問題点と開発努力の一端について紹介する。



UDC 621.313.322

発電機端部の固定子巻線に働く電磁力

野村達衛

三菱電機技報 Vol. 46・No.10・P1129～1134

近年冷却の強化によって電気装荷が増加され、発電機の端部における漏れ磁束が増加し、固定子巻線端部に働く電磁力や、固定子鉄心端部におけるうず電流による漂遊負荷損失が増加する傾向にある。

本文は固定子巻線に働く電磁力の新しい計算方法を示し、三相突発短絡時における電磁力の分布の解析を行なっている。この解析で従来考慮できなかった端部磁性構造物の影響を明らかにした。また計算値は巻線層に配置したサーチコイルによる実測値とよくあっている。回転子電流の影響は、回転子巻線にすべての回転子電流が流れるものとして計算してよいことを、計算と実測によって確認している。



UDC 628.34:546.214

オゾンによる染色排水処理

前田満雄・橋本雄二郎・小沢建樹・今村 孝・松岡宏昌・田畑則一

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1110～1115

最近オゾンの工業的応用としての排水処理が開発されており、オゾンは、排水中の汚濁成分（シアン、フェノール、悪臭成分、その他）を酸化分解する。特に染色排水を強力に脱色し、スラッジを生成しない。当社では1971年度通産省補助金交付をうけて、世界でも初めてのオゾン応用染色排水処理の工業化プラントを完成し、実地試験を行なった。これは凝集処理と組み合わせて100m³/hの排水を処理するものである。

三菱オゾンナイザは、4g-O₃/h～5kg-O₃/hまでの一連のシリーズを完成し、各種排水のオゾン処理プラントの商業化を進めている。本報告では染色排水処理について紹介する。



UDC 537.52:621.391

プラズマ ディスプレイ

倉橋浩一郎・鳥取 浩・磯貝文彦

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1135～1139

平板形マトリックス ディスプレイとして、パネル自身にメモリ機能を有するプラズマ ディスプレイが有望視されている。このディスプレイの表示素子であるプラズマ パネルを試作して、その特性を実験調査した。駆動電圧については二次電子放出係数が大きい鉛ガラスを用いることによって200V以下にできることを確認し、分解能については、0.3mm絵素間隔が可能ながわかった。また、128×128絵素のプラズマ パネルを用いて、試作したキャラクタ ディスプレイの概要を合せて紹介した。



UDC 535.12.06:536.36.03:539.16.08

レーザレーダによる排煙流の観測とSO₂濃度の測定

中原昭次郎・伊東克能・伊東 尚

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1116～1121

この報告は環境制御特集号でのべた公害監視用レーザレーダの続編で、フィルタなど分光系と信号処理回路を改良して測った排煙中のSO₂濃度の測定や、排煙流の拡散状況の観察など実験結果を主体にのべたものである。ミイ散乱については観測結果を元に、大気散乱が原因となって決まる測定可能な限界距離を求めた。ラマン散乱については、世界ではじめて実際の煙突より排出される煙の中のSO₂濃度を測定することに成功した。

このように、このレーザレーダは装置1台でSO₂排出濃度と煙突の有効高さを測れる特長的なものである。このため、煙がSO₂の排出基準に適合するかどうかの判定を下せるものである。また、監視装置として高い価値を持つものであることが実証された。



UDC 621.38.049-7-181.4:681.11.114

水晶腕時計用CMOS IC

大久保利美・中山光雄・坂根英生・安岡晶彦・堀場康孝・鍋谷 弘・富沢 孝

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1140～1146

CMOS ICはその雑音余裕度とスイッチング速度が大きく、さらに動作電圧、消費電力が非常に小さいという特色を持つため、携帯用機器の分野へ最近急速に発展しようとしている。ここで述べるシリコンゲートCMOS ICは、これらの特色が特に強く要求される小形水晶腕時計用として試作されたものである。

この試作ICにおいては、水晶発振式腕時計の全電子回路、すなわち発振回路部、周波数分周部、およびモータ駆動出力部が1チップ内に作られ、さらにこのチップはビームリード ボンディング技術を用いた超小形パッケージ内に収められている。ここでは試作ICの電子回路および製造法について述べる。



UDC 538.652:621.314.2

珪素鋼板の磁気ひずみの変圧器騒音への影響

土屋英司・岡田 将・河上英典

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1122～1128

騒音規制法の施行や最近の公害意識の高まりもあって、変圧器の低騒音化についての要求が年々きびくなっている。低騒音変圧器を実現するための一つの手段として、騒音源自体の諸性質に着目して低騒音化を図るいわゆる音源対策として、音源の一つである磁気ひずみと変圧器騒音の関係を調べる研究が最近盛んに行なわれるようになった。

本報告は、鉄心素材の磁気特性を変化させた模型変圧器、鉄心に曲げや空げきを与えた模型変圧器、および磁気ひずみの大きさを変えた素材による大形変圧器に関する騒音の研究成果で、磁気ひずみが、変圧器の騒音に関与することが述べられている。



UDC 661.847:539.23:534.8:539.312.62

ZnO薄膜超音波トランスジューサの試作

戸村光一・大西 勝・吉沢達夫

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1147～1152

われわれは、ZnSe蒸着膜を酸化処理することにより、比較的簡単にZnO薄膜が形成できることを発見した。

この方法により形成したZnO薄膜が超音波トランスジューサとして利用できるかどうか知るための基本的な検討を行なった。

この結果、ZnO薄膜のC軸配向性、圧電定数、抵抗率の改善のために、不純物としてAl, Liを添加することおよび加熱処理条件を考慮すれば、この方法により形成したZnO薄膜はかなり良い圧電特性を示し、超音波トランスジューサとして使用することができることがわかった。以下にこれらの点について検討した結果を報告する。



「三菱電機技報」 アブストラクト

UDC 546.19:548.5

GaAs気相エピタキシャル結晶

三木秀二郎・伊藤道弘・織田隆雄

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1153～1157

最近、GaAsを材料とするマイクロ波素子が盛んに用いられてつある。それらの素子製作の基礎となるエピタキシャル成長技術のうち、Ga-AsCl₃-H₂系によるGaAs気相エピタキシャル法について研究を行なった。

GaAsエピタキシャル層中に混入する不純物のうち、特にSiの影響が大きい。エピタキシャル層と基板との境界に生じる高抵抗を防ぐため、ガスエッチングを行なうか、n⁺緩衝層を設けることにより良好な結果を得た。SnまたはH₂Sをドーピングすることにより、エピタキシャル層のキャリア濃度を制御することができ、多層構造のエピタキシャル結晶の成長が可能となった。

UDC 661.632.2:621.795.3

塗装におけるリン酸塩処理の再評価

島本幸三・駒沢吉郎・岩田義郎

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1177～1182

塗装の下地処理に広く使用されている種々のリン酸塩処理のなかから、特に亜鉛系と鉄系を取り上げて再評価を試みた。これは両系統のリン酸塩処理剤の組成・皮膜の耐食性、スラッジ生成量および代表的塗料（溶剤形塗料・電着塗料）に対する適合性を調べたものである。

この結果リン酸塩処理剤の組成は、皮膜の性能を左右する重要な因子であり、いずれの塗料に対しても選択性があることを見出した。また従来耐食性に劣るとされていたリン酸鉄系処理剤は、配合剤の改良により、亜鉛系のレベルまで性能が向上していることを見出した。

UDC 621.791.72

低真空形電子ビーム溶接機用プラズマ電子銃

上山善司・安永政司・佐々木茂雄・田野正博

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1158～1162

プラズマ電子銃は、陰極部の構造が簡単かつがんじょうで、電子ビーム溶接機に適用した場合、溶接作業室の内部が10⁻²torr程度の低真空になっても、ほとんど支障なく動作させることができるなど、低真空形電子ビーム溶接機用の電子ビーム源として、適した特性を持っている。

この報告では、低真空形電子ビーム溶接機用電子ビーム源として、実用化したプラズマ電子銃の設計概念について、10kW級のプラズマ電子銃から得られた電子ビームの集束点における、電子流密度分布の実測結果を紹介する。

UDC 621.365.5

大容量バーヒータ

喜多村弘明・松尾 茂・豊田 烈

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1187～1189

誘導加熱装置は、無公害化、ラインの自動化、品質向上等の点からますます用途は拡大され、需要も増大しつつある。バーヒータもその例にもれず、このたび国産初の大容量バーヒータを納入して好調にか(株)動している。ここにその概要を説明する。このバーヒータは、スイスのハテパー社製のAMP70と称する高速自動鍛造機とカプルして自動車部品を高速生産できる。容量が大きいことと、外国の機械とカプルさせる点で技術的にむずかしい点が多々あったが、豊富な経験と技術によってみごとに克服した。

UDC 62-52:681.31

省力化、自動化機器へのミニコンの導入

菰原 智・壺井芳昭・弘中一光・正田茂男・丸山寿一・白石 強

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1163～1170

省力化、自動化のための機器が複雑、高性能になるにしたがって、その制御には高度の判断機能と複雑なシーケンス制御が必要になる。そこで、従来のリレーやトランジスタによる制御回路に代わり、ミニコンピュータにより制御する方法が実用化されつつある。これらの分野におけるミニコンの実用例として下記のものについて述べる。

- 1) 計算機NC
- 2) 工業用ロボット
- 3) NC旋盤用ローデングアンローデングシステム
- 4) ベルトコンベヤ自動仕分け装置、5) 自動試験装置

UDC 621.311.6:620.193

金属材料の冷却水による腐食

田辺 愈・市田行則・山本利雄・光本誠一

山内 敦・森 章文・川中 進

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1190～1200

都心のビル等地下に設置される地下変電所用変圧器の冷却装置は、水系統、油系統、付属部品等を含め総合的な信頼性、経済性が要求されるが、そのうち特に変圧器用冷却装置に対する水質と使用金属材料の腐食との関係を明らかにし、経済的かつ高信頼度のある冷却装置を設計すると共に、適正な水質管理と保守基準を作成するために、このたび東京電力と共同研究を行なった。この結果、現状における冷却水の分析、各種金属材料の腐食程度がわかり、腐食量と水質、水温、流速の関係式を求め、水質管理と保守の基礎資料として十分なデータを得ることができた。これによると三菱電機の標準の熱交換器は実用的な水質を考慮して30年以上の寿命が期待できる。

UDC 537.363:621.315.3:667.621.7

電着絶縁方式MEDISの開発

柴山恭一・佐藤文彦・小野 博・地大英毅

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1171～1176

従来の電着塗装方法を絶縁皮膜形成に適用した“MEDIS”(Mitsubishi Electro-Deposition Insulating System)は、水分散系コロイド粒子を電気泳動によって導体に析出させた後、特殊な後処理方法を施して、相互融着させることを特長とした電着絶縁方式である。MEDISの利点を簡単にまとめてみると

1 回の塗布で200～300μ程度の厚膜が可能、ピンホールおよび偏肉のない均一な皮膜が可能、電着電圧を制御することにより簡単に膜厚を管理しうる、水分散系ワニスを使用しているため大気汚染が少ない。

現在量産されているのはB種のエナメル電線だけであるが、新しい材料の開発に伴い、飛躍的な発展が期待されている。

UDC 621.315.615.2

絶縁油の低温における交流破壊電圧に及ぼす水分の影響

上田 実・石井敏次

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1201～1204

寒冷地で使用される変圧器においては、絶縁油の低温における破壊電圧が問題になる。2号鉱物油、アルキルベンゼンおよびシリコン油の低温における交流破壊電圧と油中水分量との関係を調べた。

交流破壊電圧は油中水分が比較的多い領域では、油中水分が過飽和状態になって油が自濁しはじめる温度で極小値を示し、油中水分がある値よりも少なくなると、油中水分量には関係なく油の粘度が100～200cpになる温度で極小値を示すこと、破壊電圧が温度の上昇とともに増大する領域における破壊電圧と水分ならびに温度との関係は、水分飽和度なる量を用いれば、簡単に表わし得ることなどが明らかにになった。

「三菱電機技報」アブストラクト


UDC 681.142.004 Others

電子計算機によるプリント配線板の完全自動化検査システム

小島一男・田中千代治・上野靖彦・柳沢 寛・金田 一・松沼武夫

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1205～1216

プリント配線板の機能の可否を判定し、不合格の場合はその不良箇所を指摘する自動検査システムを開発した。2種類の検査ステーションを1台の電子計算機 MELCOM-1530で制御しており、一方は論理機能を検査するファンクションテスト、他方はパルス波形を観測するパラメトリックテストを行なう。検査結果はテープ プリントまたはタイプライタに印刷され、交換すべき部品を知ることができる。

プリント配線板ごとにあらかじめ検査パターンとそれを組み込んだ検査プログラムを準備する必要があるが、ファンクションテストの場合は、MELCOM-7000を使ってこ  れを自動的につくるソフトウェアを用意している。

UDC 543.422-12

原子吸光分析法の応用

島田和彦・吉留昭男

三菱電機技報 Vol.46・No.10・P1217～1222

原子吸光分析法は、微量金属の定量法として1960年ころから用いられている。また、最近環境汚染の規制にともなって、排水、土壌、食物などの有害金属の定量法として、その主力をなしている。当社においても、けい光体、半導体、ランプ材料などの微量金属の定量に応用した。さらに、各製作所に原子吸光装置を設置して、工場排水、土壌中の有害金属および米中のカドミウムの定量に用いて、公害防止に大きな役割りを果している。

本文では、これら原子吸光分析法の応用に関する検討結果について報告する。



超高速列車磁気浮上方式の研究

大野 栄一*・岩本 雅民*・荻野 治**

河村 寿三***・忍 正 寿***

Study on Magnetic Levitation for High Speed Trains

Central Research Laboratory Eiichi OHNO・Masatami IWAMOTO・Osamu OGINO
Itami Works Toshimi KAWAMURA・Masatoshi SHINOBU

Success in the New Tokaido Trunk Line has renewed the understanding on the position of the railroad as high speed mass transportation facilities by land and has urged the development of super-high speed railroads at much higher speed. The super-high speed train, freed from the restriction on the conventional type coming from adhesion, current collection and wheel support, is supposed to operate by direct propulsion with linear motors and by suspension and guidance with utilization of magnetic force. For the generation of this magnetic force is the most suitable the superconducting magnet being light in weight and having no power loss.

This article describes the principle and constitution of magnetically levitated trains by the use of the super-conducting magnet and introduces problems and engineering efforts in the development.

1. ま え が き

東海道新幹線の成功は、世界的に陸上での高速大量輸送機関としての鉄道の地位を再認識させるとともに、さらにより高い速度をめざした超高速鉄道の開発へとかり立てている。

鉄道はその名の示すとおり、鉄のレールと車輪に象徴されて発展してきたが、このためにいわゆる「粘着の壁」、 「車輪支持の壁」および「集電の壁」という三つの障害が生じ、300 km/h をこえる超高速の実現は困難となる⁽¹⁾。

ここに、これら従来の鉄道方式から完全に離れた、新しいシステムが必要となる。すなわち、空気浮上または磁気浮上などの非接触支持を用いた浮上列車による車輪支持からの脱却と、リニアモータによる直接推進の採用である。リニアモータを地上一次式にすることにより、粘着の壁から逃れると同時に、集電も不必要とすることができ、わが国のような大量輸送需要の見込まれる場合にはとくに有効と考えられる⁽²⁾。

列車の浮上方式としては、表 1. 1 に示すような方式が実用性ありとして、世界各国で競って開発されていることは周知のとおりである。

空気浮上によるものとしては、フランスのエアロランが最も進んでいる。コンクリート製の逆T形案内軌道の上で、最高速度 422 km/h の記録を出しており、すでに 80 人乗りのモデル車による試験も実施されている。またリニアモータ推進と組み合わせた空気浮上車も開発され、パリ 郊外で新しい衛星都市との間の交通機関に実用されようと

している。その他、イギリスのホーバトレン（箱形案内軌道）や、アメリカの TACV（U 形案内軌道）などいずれも空気浮上・リニアモータ推進を目標としている。

しかし空気浮上は騒音や空気汚染などの公害問題のほか、かなり大容量の浮上用動力源が必要なことや、わが国のようにトンネルの多い線路や長大編成の列車に対しては、技術的に難点もあると思われる。

磁気力を利用した浮上方式としては、吸引方式と反発方式がある。吸引方式は車両側の電磁石により、強磁性体で構成される軌道に吸引浮上するものであるが、吸引磁気力はそのままでは力学的に不安定であるから、制御により安定化しなければならない。この方式は西ドイツで開発され、昨年リニアモータとの組合せによる実験車を走らせている。しかし大きな吸引力を効率よく発生するには、車上と軌道側の鉄心間の空けき（隙）をかなり小さく（1 cm 程度）しなければならず、このために特に高速用の場合、高い軌道精度が要求されることが欠点となる。

永久磁石の反発力を利用する方式もマグナレールとして英国で研究されているが、実用化には問題点が多い。

超電導を利用する磁気浮上は、米国ブルックヘブン国立研究所の Powell と Danby 両氏による提案に端を発したもので、それは車両側に超電導磁石を用い、それに対向した軌道側に導体ループを用いるものである⁽³⁾。このループ方式は性能改善のためにヌルフラックス方式に発展する⁽⁴⁾。他方軌道側に導体板を用いるシート方式の研究が、米国運輸省の援助の下に進められている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

これら超電導磁気浮上は、磁気回路に鉄心を必要とせず、励磁電力が不要で、浮上高さも数十 cm と大きくとれるなど多くの長所をもち、高速車両には最も理想的な方式といえよう。ただ、この実用化に対しては、まだ大規模な一般利用の経験のない超電導・極低温技術を本格的に採用することが前提となり、強力な技術開発が要求される。

東京―大阪の第 2 新幹線というさし迫った輸送需要をもつ日本はもちろん、アメリカ・カナダ・西ドイツ等世界各国でも、超電導磁気浮

表 1. 1 列車浮上の方式
Train suspension systems.

{	空気浮上	{	充満室形		
		{	周辺ジェット形		
{	磁気浮上	{	吸引制御式 (常電導)		
		{	誘導反発式 (超電導)	{	シート式
				{	ループ式
				{	ヌル フラックス式

上が最も公害の少ない有効な高速大容量地上輸送機関の本命として開発が進められている。

当社でも国鉄関係者のご指導の下に研究開発を進めているが⁽⁴⁾、ここでは超電導磁気浮上について、原理・方式・問題点とともに、最近の開発の一端などを紹介する。

2. 超電導磁石による浮上

2.1 ループ軌導方式

図 2.1 に、超電導浮上に必要なコイル配置を示す。車上ループは、超電導磁石であって車両の床下にとりつける。軌道ループは、軌道に埋め込まれた短絡コイルであって銅やアルミで作られる。超電導磁石を励磁して、軌道面に向かって磁束を作り、車両を走行させると、超電導磁石の磁束によって軌道ループにうず電流が誘起される。このうず電流が軌道電流となり、車上ループの磁力線との間の電磁反発力によって車両が浮上する。車上ループとして超電導磁石を使用するのは、強い磁界を広い空間に、励磁電力を使わないで発生させるためのものである。

この種のコイル配置における浮上特性は、電子計算機による数値計算でほぼ厳密に解くことができる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。車両の編成は十分長いものとし、車上ループは車両の長さ方向に異極的に励磁されているとする。このとき、軌道ループに誘起される電流 I_R は、次式で与えられる。

$$L \frac{dI_R}{dt} + RI_R + \sum_n M_n \frac{dI_{Rn}}{dt} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{dM}{dt} I_0 \quad (2.1)$$

L , R は軌道ループのインダクタンスと抵抗, M_n は他の軌道ループとの間の相互インダクタンス, I_{Rn} は他の軌道ループの電流, ϕ は車上ループの作る磁束による軌道ループの鎖交磁束, M は車上ループと軌道ループの間の相互インダクタンス, I_0 は車上ループの電流とする。

方程式 (2.1) を厳密に数値計算し、浮上特性を求めることが可能である。しかし、ここでは複雑な計算をしないで、概略の浮上特性を見通すために、式 (2.1) を基本波のみについて解く簡便法によって、特性を検討しよう。基本波の周波数は、

$$\omega = \pi v / l_{TP}$$

ただし、 v は車両の速度、 l_{TP} は車上ループのピッチとする。式 (2.1) の第 3 項を無視して基本波について解くと、

$$I_R = \frac{MI_0}{L} \cdot \frac{1}{1 + (1/j\omega\tau)} \quad (2.2)$$

となる。 τ は軌道ループの時定数、 $\tau = L/R$ である。これから、浮力 (時間平均値) は

$$F_L = \frac{\partial M}{\partial h} R_e(I_R I_0) = \frac{I_T^2 M}{L} \cdot \frac{\partial M}{\partial h} \cdot \frac{1}{1 + (1/\tau\omega)^2} \quad (2.3)$$

ここで、 h は浮上高さとする。一方、軌道ループの銅損は、車両に対して電磁的な抗力を発生する。この抗力は次式で与えられる。

$$F_D = \frac{RI_R^2}{v} = \frac{\pi}{l_{TP}} \cdot \frac{I_T^2 M^2}{L^2} \cdot \frac{1}{\omega\tau + \frac{1}{\omega\tau}} \quad (2.4)$$

図 2.2 は、式 (2.3) (2.4) から浮力と抗力の速度依存性を示したものである。低速では浮力が小さいから、低速走行用に補助車輪を車体につける必要がある。抗力は高速ではかなり小さくなるが、低速領域にその極大値があらわれる。この抗力の極大値に打ち勝って車両を加速しなければならぬ。(3.1 節参照)

浮力と抗力の比は drag ratio と呼ばれ、浮上性能を示すパラメータ

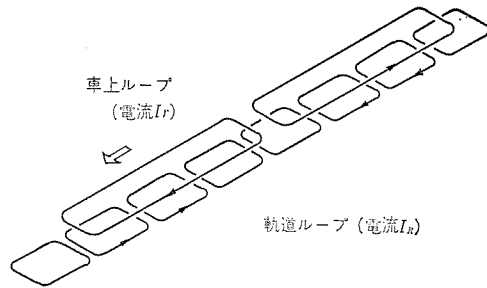


図 2.1 ループ軌道のコイル配置
Coil arrangement in loop track system.

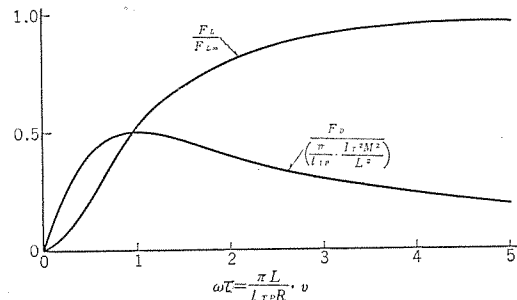


図 2.2 浮力・抗力の速度特性
Velocity dependence of lift and drag forces.

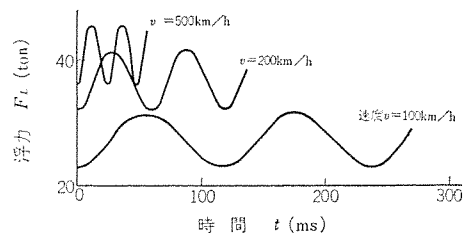


図 2.3 浮力の波形
Waveforms of lift force.

である。傾向としては drag ratio が大きいほど浮上特性が良いと考えられる。drag ratio は、次式で与えられる。

$$F_L/F_D = \frac{L}{M} \cdot \frac{\partial M}{\partial h} \cdot \frac{v}{R} \quad (2.5)$$

この式から drag ratio を大きくするには、速度 v を高くするか軌道ループの抵抗 R を小さくすればよい。また、軌道ループに、外部インダクタンスをそう入して L を大きくしても、あるいは M を小さくしても高い drag ratio が得られる。しかし、 L , M を変化させるのは、式 (2.3) からわかるように浮力 F_L を減らす方向であるから、その分だけ車上ループの電流をふやしてやらなければならない。

図 2.3 は、厳密な数値計算によって浮力の波形を求めた例である。脈動成分を含むことがわかる。この脈動の周波数は $f = v/l_{RP}$ 、ただし、 l_{RP} は軌道ループのピッチで与えられる。この脈動的な浮力は、ループ軌道に特有なものである。車両振動をひきおこし、乗りごちに影響するだけでなく、超電導磁石の AC 磁界の原因となるから十分留意しておく必要がある。軌道ループのピッチを小さくすれば、脈動成分を小さくできるから、はしご形の軌道ループも考えられる⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

2.2 シート軌道⁽⁵⁾⁽⁶⁾

軌道側に金属シートを布設しておいても、同様な原理で浮上する。浮力の脈動成分がないこと、比較的大きな浮力が得られることが特長である。シート軌道の厳密な解析は必ずしも容易ではない。ここでは、Maxwell の電磁方程式をオーダ的に解く方法による解析結果

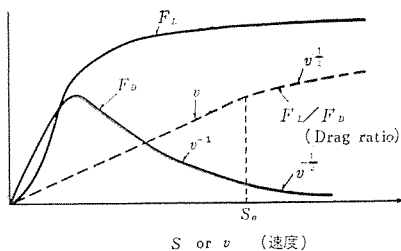


図 2.4 シート軌道の浮上特性
Levitation characteristics of sheet track system.

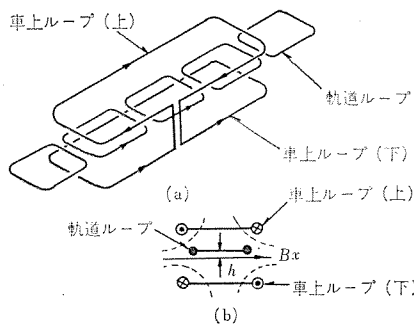


図 2.5 ヌルフラックス方式
Basic configuration of null-flux system.

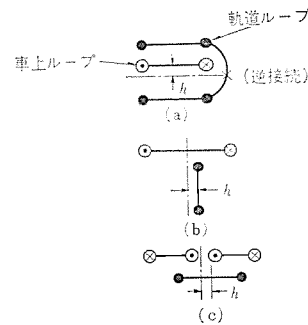


図 2.6 ヌルフラックスの変形
Variations of null-flux system.

表 2.1 シート方式における Drag ratio の関係
Relation of drag ratio in sheet track system.

Drag ratio	200	100	70	50	30	20
車上コイル長 L (m)	40	10	5	2.5	0.9	0.4
周波数 f (Hz)	1.8	7	14	28	78	175
Skin depth (cm)	6.3	3.1	2.2	1.5	0.9	0.6
軌道シート重量 (ton/km)	400	200	140	100	60	40

注 1) 軌道シートは Al
2) Drag ratio は時速 500 km/h (秒速 140 m/s) での値
3) 幅 2 m, 厚さは Skin depth を仮定

をまとめておく。Maxwell の方程式で $\text{grad } B \sim B/l$ とおく。 l は磁界こう配を与える特性的長さで、軌道コイルの長さや表皮深さなどに関連づけられる。このとき、

$$S = \mu_0 \sigma v l \quad (2.6)$$

とくと、浮力および抗力は次のようになる。

低速すなわち $S \ll 1$ では、

$$\left. \begin{aligned} F_L &\propto S^2 AB_m^2 / \mu_0 \\ F_D &\propto SAB_m^2 / \mu_0 \\ F_L / F_D &= S \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

高速、すなわち $S \gg 1$ では、表皮厚さで制限されるから、

$$\left. \begin{aligned} F_L &\propto AB_m^2 / \mu_0 \\ F_D &\propto S^{-1/2} AB_m^2 / \mu_0 \\ F_L / F_D &= S^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ただし、 B_m は超電導磁石の作る磁界、 A は超電導磁石の面積とする。超電導磁石の長さを L とすると

$$l \sim L / 2\pi \quad (2.9)$$

とおけばよい。図 2.4 は、シート軌道の浮上特性を図式的に示したものである。

シート軌道では、軌道の誘起電流が多いために、車上の超電導ループのアンペアターンは小さくてすむ。drag ratio は一般に小さい。drag ratio を大きくするには、シートの厚さを大きくすると同時に、車上の超電導ループの長さ L を大きくして、シートに加わる磁界の周波数を低くしてやる必要がある。表 2.1 に車上ループの長さ L と drag ratio の関係を示す。

2.3 ヌルフラックス (null-flux)⁽⁹⁾

この方式は、drag ratio を高め、磁気支持のばね定数を大きくする巧妙な方法であって、図 2.5 にその原理を示す。超電導の車上ループを上下 2 個設け、その間の空間に軌道ループを入れて、サンドイッチ状に各ループを配置する。このときの磁力線は、同図 (b) に示すようなカスプ形となる。軌道ループの導体位置における磁界の構成分を B_x とすれば、車上ループと軌道ループ間の相互インダクタンス M は、中央位置からのずれを h として、

$$M \approx 2B_x h / I_0 \quad (2.10)$$

表 2.2 磁気浮上方式の比較
Comparison of magnetic levitation systems.

構 成	車 上	誘 導 反 発 式			直流励磁反発式	磁気吸引制御式
		コイル式	ヌルフラックス式	シート式		
軌 道	地上	短絡ループ	短絡ループ	シート	SCM	制御電磁石
浮上力/抗力比 (Drag ratio)		大~100	極大~500	中~50	∞	極大
浮力変動		あり	あり	なし	なし	なし
浮上高さ		大 (30 cm)	大	大	大	小 (1 cm)
静止浮上力		ゼロ (補助支持装置必要)			一定	一定
低速抗力		大			なし	極小
S C M 起磁力 (AT)		中	大	小		
ばね定数		小	大	小	小	大
ダンピング		そのままでは不足 (ダンピング対策必要)				調整可能

これを、式 (2.2)~(2.5) に代入すると、ヌルフラックス軌道の浮上特性を与える理論式が導出される。

$$\left. \begin{aligned} F_L &= \frac{4B_x^2}{L} \cdot h \cdot \frac{1}{1 + (1/\tau\omega)^2} \\ F_D &= \frac{R}{v} \cdot \frac{B_x^2 h^2}{1 + (1/\tau\omega)^2} \\ F_L / F_D &= v\tau / h \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

車上ループのアンペアターンを強くし、 B_x を大きくすれば、浮上のばね定数 $\partial F_L / \partial h$ を大きくすることができ、つり合い位置と中央位置のずれ h が小さくなる。ずれ h が小さくなれば、式 (2.11) からわかるように、drag ratio F_L / F_D が大きくなる。

ヌルフラックス軌道の問題点は、各ループの配置構造が複雑であり、しかも、比較的大きなアンペアターンの車上ループを必要とすることにある。しかし、ヌルフラックスの本質は、相互インダクタンス M が、式 (2.10) のように、ずれ h の寄関数で表わされることにある。この観点から考えると、多くの変形ヌルフラックスが可能である。図 2.6 はその主要例で、いずれもずれ h に対して復元力を発生する。

2.4 浮上方式の比較

各浮上方式の特長の比較を表 2.2 にまとめておく。表中、直流励磁反発方式とは、車上の超電導ループをすべて同極性に励磁し、軌道側には地上電源から直接、直流を流して反発浮上させる方式である。磁気吸引制御式は、西独で開発されている方式である。

超高速鉄道として、これらのいずれの方式が最適であるかについては、システム全般にわたる総合的な検討をまたねばならない。

3. 磁気浮上列車実用化の検討

超電導磁気浮上の基本的特性については前章に述べた。実際にこれを車両に適用するには、浮上のみでなく、案内・推進も含めた多

この問題を解決しなければならないことはいうまでもなからう。ここでは、とくに超電導磁気浮上に伴って生じる磁気 Drag と、推進装置との関係を中心に検討を加え、実用車両の基本構想を描く。

3.1 磁気 drag と推進特性

磁気浮上列車の走行抵抗は、図 3.1 に示すように、空気力学的抗力 D_A と磁気 drag D_M の和となる。 D_A は速度の 2 乗に比例して増加するのに対し、 D_M は先に述べたようにほぼ速度に逆比例して変化する。したがって低速域では磁気 drag が大きく、高速域では逆に空気抵抗が大きくなる。

図 3.2 には具体例として新幹線級の列車を想定し、その 1 両分についての空気抵抗と、drag ratio をパラメータとしたときの列車総抵抗を示したものである。

これらの図からもわかるように、とくに問題となるのは低速における drag peak で、定推力のリニアモータで加速しようとしても、最悪の場合 drag のほうが大きくなって加速不可能になってしまうことが考えられる。

この drag peak 対策としては

(1) 浮上特性自身の改善: drag peak は図 3.3 に示すように、原点から浮上力の特性曲線に引いた接線の交点に対応する速度 v_0 で生じる。Drag D は drag ratio を δ として

$$D = F/\delta = F/\alpha \cdot v \dots \dots \dots (3.1)$$

と表わされるから、 v_0 が大きく、そのときの F が小さいほど drag peak は低くなる。したがって図 3.3 (a) のように低速での浮上力の立ち上りをゆるやかにすれば、(b) に比べて高速域での drag ratio が等しくても、drag peak はかなり低くすることができる。

実際に SCM の長さ 10 m のループ式の場合、drag ratio ≈ 100 に対して $v_m/v_0 \approx 10$ となり、図 3.2 に点線で示したような特性が得られるため、そのままでも定推力のリニアモータで十分加速できる。

(2) 他の手段による特性の改善: さらに積極的に drag peak

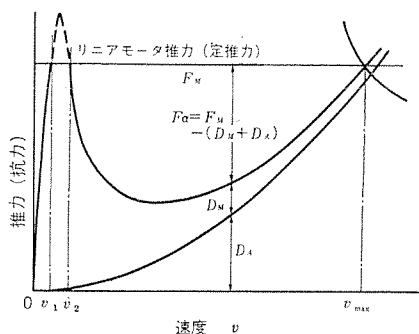


図 3.1 磁気浮上車両の走行抵抗
Drags of magnetically levitating vehicle

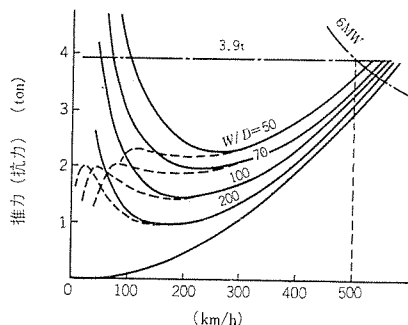
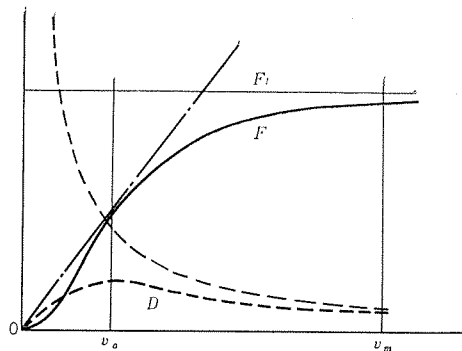
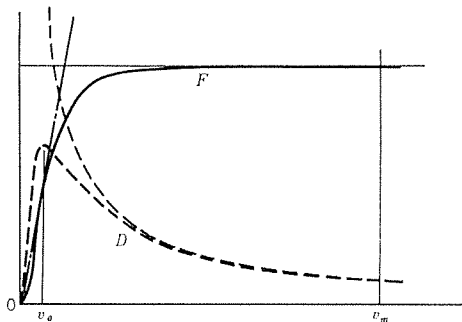


図 3.2 Drag ratio と走行抵抗の実例
A calculated example of drags of magnetically levitating vehicle.



(a) $v_m/v_0 \ll \text{Drag ratio}$ のとき



(b) $v_m/v_0 \approx \text{Drag ratio}$ のとき

図 3.3 浮上特性と Drag peak
Levitation characteristics and drag peak.

を避けるためには、次のような手段を適宜用いればよい。

(a) 車輪等の補助支持装置により、超電導コイルと軌道側導体の距離を大きくする。

(b) 超電導コイルの励磁電流を減少させる(永久電流モード運転の場合は適用できない)。

(c) 低速走行区間の軌道導体の仕様を変える。

3.2 最適 drag ratio の経済評価

磁気 drag は可能ならばゼロにしたい。しかし、前に述べたように、これは軌道側導体中の I^2R 損失であるから、浮力の発生に伴って必ず発生する必要悪である。これを小さくするには導体中の電流 I または抵抗 R を小さくすることである。前者を行なうためには車上の超電導コイルの AT を大とし、null-flux または外部リアクトル付とすることが必要となる。後者は軌道側導体を多量に必要とする。

ここで後者について drag ratio と導体重量 (W_R) の関係を、先に検討した表 2.1 によって示したのが図 3.4 である。一方 drag に打ち勝つに必要な推進出力の増加分 ΔP は、車両重量を W として、

$$\Delta P = v_m \cdot W/\delta \dots \dots \dots (3.2)$$

これを単位軌道長当たりにして図 3.4 に示した。(ただし $W = 30 \text{ t}$)

軌道導体と推進装置の単価をそれぞれ ξ とすると、磁気浮上によって生じた軌道側単位コストの合計 C_T は

$$C_T = \xi \cdot W_R + \eta \cdot \Delta P \\ = \xi \cdot w_R \cdot \delta + \eta \cdot v_m \cdot W/\delta \dots \dots \dots (3.3)$$

式 (3.3) より C_T は δ_{OPT} にて最小値をとる。ただし

$$\delta_{OPT} = (\eta \cdot v_m \cdot W/\xi \cdot w_R)^{1/2} \dots \dots \dots (3.4)$$

軌道に Al シートを用いた場合の試算では、最適 drag ratio δ_{OPT} は 70~100 の範囲となることが得られた。

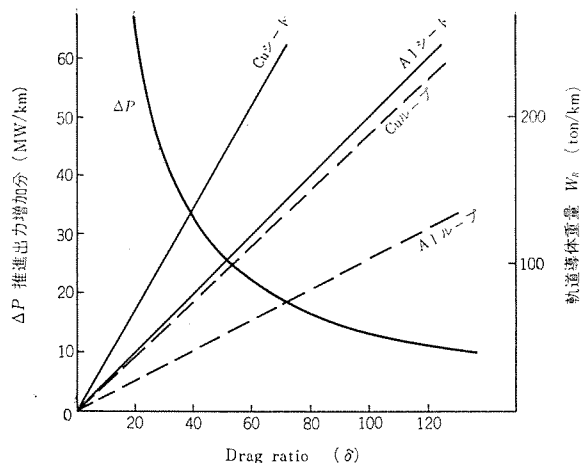


図 3.4 Drag ratio と軌道設備の関係
Relations of drag ratio with propulsion power and track conductor.

3.3 超電導電磁石の推進への利用 (LSM)

超高速列車の推進には、従来からリニアインダクションモータ (LIM) が検討され、開発が進められてきたが、とくに超電導磁気浮上列車の場合には、この超電導電磁石 (SCM) を界磁に利用したリニアシンクロモータ (LSM) が効果的と考えられる⁽⁹⁾。その基本構成を図 3.5 に示す。

LSM は、LIM に比べて、

- (1) 浮上用 SCM を利用するため、車上装置が不要
- (2) 地上 LSM は導体のみで鉄心不要
- (3) 空げき (隙) が大きい
- (4) 端効果がなく、すぐれた高速特性が期待できる

等の利点があるが、長い直線状のコイル端部により発生する推進方向以外の方向の吸引力・振動力がかなり大きくなる欠点がある。これに対しては多相化のほか、両側方式や LSM コイル幅を SCM ループ幅より大きくすることなどが有効である。図 3.6 に推力平均値と、直角方向の振動力のピーク値のループ幅増加に対する効果の例を示す。

また、これを列車長より長い区間に分割して励磁する場合、全体の力率が著しく低下すること、区間が短い場合には、浮上コイルと同様原理による誘導巡環電流による効率低下が問題となり、安定な制御法とともに、今後さらに実用化への研究開発が必要とされる。

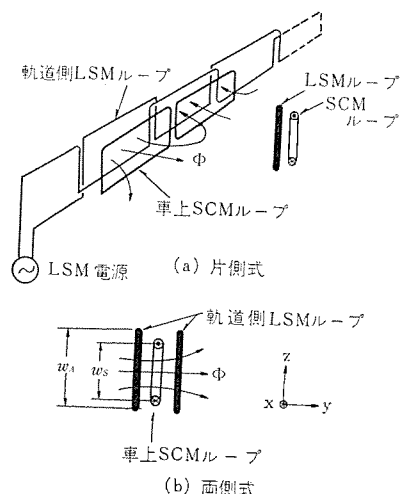


図 3.5 LSM の基本構成
Basic configurations of LSM (Linnerr Synchronous Motor)

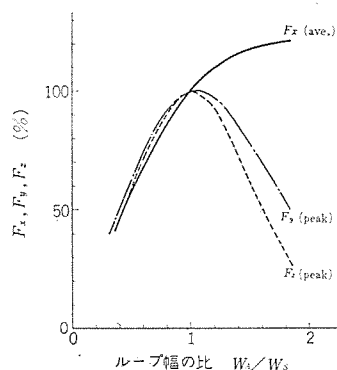


図 3.6 F_x , F_y , F_z の LSM ループ幅への依存性の例 (両側式)
($\Delta y = \Delta z = 0.05$ m)

An example of characteristics of F_x , F_y and F_z versus loop width ratio in double sided LSM.

表 3.1 実用車両方式の構成
Basic configurations of proposed magnetic levitating vehicles.

方式	浮上	案内	推進	SCM	備考
A	ループ式	スルフラックス式 (SCM 共用)	L SM	3 列	
B	ダブル L 形シート式		L SM	3 列	
C	ダブル L 形シート式		L IM	3 列	LIM Gap 制御は別途必要
D	ループ式	ループ式 (スルフラックス式) (SCM 共用)	L SM	4 列	
E	円形断面シート式 (SCM 共用)		L SM	1 列	Magneplane 文献 ⁽¹⁰⁾

3.4 実用車両の構成

以上検討してきたところを総合して、超電導磁気浮上列車の基本構想として考えられるものを図 3.7 に示す。

ここで、案内については、基本的には浮上と同じ原理によるものであるが、その方式により A, B, C, D の 4 方式とした。

さらに方式 E は、MIT グループにより提案されている magneplane で円形断面を持つ車体構造に特長がある⁽¹⁰⁾。

各方式について表 3.1 に概略を示した。

これらの方式の優劣、さらにここにあげた方式よりすぐれた方式の可能性など、多くの問題があるが、いずれにしても、浮上、案内および推進が全体として矛盾なく実施されとともに、地上・車上の所要電力、地上・車上の設備、車体の振動、乗りごち、運用の経済性などの点から最適のものでなくてはならない。

4. 超電導磁気浮上装置の開発

超電導磁気浮上による超高速鉄道の実現に際して、技術開発を最も必要とするのはやはり超電導関係である。超電導の現象は 1909 年に発見された新しいものであり、実際に実験用電磁石が作られはじめたのも 1960 年以降である。超高速鉄道のような一般用途に大量に実用されようとしているのは、他にも例がない。

これが成功するためには、磁気浮上に特有な技術的要求を満足したうえに、さらにそれらが小形・軽量化され、最小の保守で、最高の信頼度を確保しなければならない。

以下、これらの要求に向って進められている技術努力を簡単に紹介する。

4.1 超電導コイル

超電導コイルは、浮力・案内力を直接発生する要素であって、磁

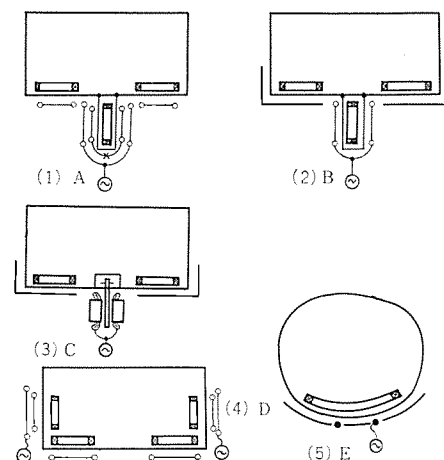


図 3.7 実用車両の基本構想
Fundamental configuration of magnetically levitating vehicles.

気浮上列車の心臓といえる。超電導は、極低温で始めて得られる一種の熱力学的な相であることが、従来の常電導磁石と本質的に異なる点である。

(1) 安定性：超電導の安定性 (stability) は、
(a) 完全安定
(b) 準安定
(c) 非安定
の3段階に分類される。一般に電流密度が低ければコイルは完全安定に、また電流密度を高くすると不安定になる傾向がある。電流密度を高くすることは、超電導磁石全体を軽量化する点で有利であるが、安定性が低下し、超電導破壊を起こしやすくなる。

超電導破壊が発生したとき、コイルの磁気エネルギーは、温度上昇と異常電圧として放出されるから、焼損ないし絶縁破壊が生じる危険性がある。これらの事象は、電流密度が高くなると過酷になる。このための保護装置は、超電導コイルの運転制御法、車両の全システムなどとの関連で決定されなければならない。

(2) 交流磁界：浮上用の超電導磁石は、機械的振動や交流磁界に十分耐えることが要求される。交流磁界の超電導磁石に対する影響は、

- (a) 超電導特性への影響
- (b) 冷却負荷としてのAC損失
- (c) 永久電流の減衰
- (d) 振動的な電磁力

などの点から検討する必要がある。

表4.1は実用的規模の浮上用超電導コイルについて、交流磁界の原因と交流損失の関係を試算したものである。軌道ループの反作用磁界によるものが最も大きい、磁気シールドを用いて解決できると思われる。また、熱シールド板やクライオスタット構造物も、導電性磁気シールドとしての効果を有する。

シールド板は、車両の上下振動に対しても、ダンパとして作用する効果を生じる。

(3) 所要AT：超電導コイルのATはシート式が最も低く、150~200kAT、ループ式が次で200~300kAT、ヌルフラックス式ではさらに高く300~500kATが大体の標準と考えられている。これは先に述べたLSMの関係もあり、推進用LSMと兼用する場合には、高いATが有利となる。

その他、電流供給リード・永久電流スイッチ・励磁制御方式などいずれも信頼性が高く、操作が確実で容易なものの開発が要求される。

4.2 クライオスタット

ここでは、超電導コイルを極低温に保持する低温容器としてのクライオスタットの問題点は、軽量化と熱損失の低減である。

(1) 軽量化
車体の底部に取付け可能な扁平形状で、内部は真空断熱構造となるが、これに対して必要にして十分な強度を与え、かつ軽量化を達成することが最大の問題点となる。このため補強メンバの活用による薄板構造で限界強度設計が行なわれる。

また材質についても、ステンレス鋼のほか、アルミ系・チタン系の材料を使用して軽量化を図っている。表4.2にはこれらの材料についての特性比較を示す。

(2) 断熱支持
クライオスタットは、内部の超電導コイルに発生する浮上力や案内力、常温部の車体に最小の侵入熱量で有効に伝達する断熱支持方式をも

表 4.1 浮上用超電導コイルの交流損失 (計算例)
AC losses in superconducting magnets for levitation
(calculated value).

原 因	交 流 磁 界				備 考
	磁 界 (G)	周波数 (Hz)	磁気シールドなし (W)	磁気シールド有り (Cu 5mmt LN ₂ 冷却) (W)	
軌道ループの反作用	30~125	60	700	7	シートでは生じない
列車振動の反作用 (振幅 250 mm±5%)	20	1.5	2	1	
軌道不整 (±2.3 mm/8 m) (500 km/h)	4	15	0.5	0.05	

表 4.2 クライオスタット構造材料の比較
Comparison of characteristics of structural
materials with cryostat.

材 料	ステンレス鋼	チタン合金	高力アルミ
成 分	18%Cr, 8%Ni	5%Al, 2.5%Sn	4.5%Cu, 1.5%Mg 0.6%Mn
許 容 応 力 (kg/mm ²)	15	35	14
比 重	7.9	4.5	2.8
比 強 度 (許容応力/比重)	1.9	7.8	5.1
重 量 比	1	0.25	0.37
ヤ ン グ 率 (kg/mm ²)	20,400	10,850	7,300
板 厚 比	1	1.2	1.4

つ。断熱支持材料としては、圧縮(引張)強度と熱伝達率の比が大きいことが要求される。方式としても熱伝達率の小さいことを利用したCSIやファイバグラスによる面支持方式と⁽¹⁾、引張強さの大きいことを利用したステンレス線やナイロン線によるテンション方式⁽¹¹⁾、その中間のコラム支持方式⁽⁵⁾などが考えられている。

CSI (Compressed Super Insulation) は、シールド材にアルミ蒸着シート、スペーサ材にナイロン系繊維質ペーパーを交互に積層し、圧縮力を加えて構成したもので、超電導コイルの入るヘリウムそう(槽)と常温真空そうの間に装着して、すぐれた断熱支持特性を呈する。このCSIを用いることにより、超電導コイルと、クライオスタット表面の間隔きも小さくすることができ、電磁力を有効に利用することができる。これを用いたクライオスタットの実例については4.4節に述べる。

4.3 冷却システム

超電導コイルが、その機能を発揮するためには、これを常に液体ヘリウム温度の極低温に保たねばならず、この冷却システムの成否は、超電導磁気浮上全体にとってもきわめて重要なテーマである。

冷却システムは前述のクライオスタットとヘリウム液化冷凍機から成り、個々の開発はもちろんのこと、さらに両者を一体として効果的に完成させることが必要である。

ヘリウム液化冷凍方式については、地上基地供給方式と、車上液化方式の二つの基本方式が検討されている。実際の車両の運行を考えると、車上で超電導コイルの予冷、ヘリウムの液化および蒸発ガスの回収の三つの機能をもつ車上液化方式が、最も理想的であると考えられる。しかしその実用に際しては以下の問題点がある。

- (1) 長期間にわたる完全自動連続運転
- (2) クライオスタットとの組合せ安定性
- (3) 高液化効率(低所要動力)
- (4) コンパクト化、軽量化

これらは、かなりの難問に思えるが、重点的研究開発の努力による飛躍的なレベルの向上が期待される。

4.4 軽量クライオスタット

超電導磁気浮上による超高速鉄道の開発促進のため、日本国有鉄

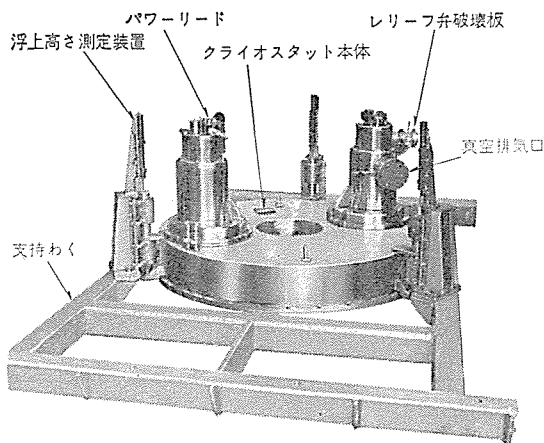


図 4.1 軽量クライオスタット組立外観
Exterior view of CSI cryostat for super conducting magnetic levitation testing.

道では鉄道技術研究所内に、超電導磁気浮上特性 基礎試験装置を昭和 45 年度設置し研究を進めている。この装置は当社のほか、日立・東芝の共同製作によるものであるが、昭和 46 年度には引続き、超電導電磁石を含むクライオスタットの軽量化による浮上時の動的試験が実施された。当社はこの軽量クライオスタットを製作し納入した（本号表紙の写真は、鉄道技術研究所内での浮上試験の模様である）。

このクライオスタットの外観は、図 4.1 に示すような偏平なドーナツ形で、Nb-Ti-Ta の 3 元合金から成る平角 Multiple 超電導線より構成される 2 個のコイルを含む。前述の CSI 断熱支持構造を活用した巻線およびクライオスタット構成により、所期目標の軽量化を十分に達成し、重量 695 kg とすることができた。

この装置はすでに浮上試験にも成功し、200 kAT の励磁により、浮上高さ 50 mm を得ることができた。

4.5 回転ドラム形磁気浮上動特性試験装置

当社では、今年度の運輸省試験研究補助金の交付を受けて、図 4.2 に示す超電導磁気浮上動特性試験装置を試作し、下記目的による研究に着手している。

- (1) 時速 360 km/h の超高速域での浮上特性の研究
- (2) 磁気浮上時のダンピング特性などを含む動特性の解明と、その安定化方式の開発
- (3) コイル方式とシート方式の各種特性の比較

これらは磁気浮上の実用化に際して重要な項目であり、装置の開発と、これを利用した実験および併行した理論解析によって問題の究明を行なう努力を進めている。

5. む す び

以上、超電導磁石を用いた磁気浮上方式を中心に、その技術的問題点と研究開発の状況を述べた。この方式は、将来の都市間輸送の根幹となるものとして、世界各国で注目され、活発な開発競争に入っている。

わが国においても周知のとおり、将来の東京—大阪間の輸送需要の増大にこたえるべく、国鉄を中心に鋭意研究開発が進められている。その完成の日の近からんことを願って筆をおく。

最後に、日ごろご指導賜っている日本国有鉄道関係のかたがたに

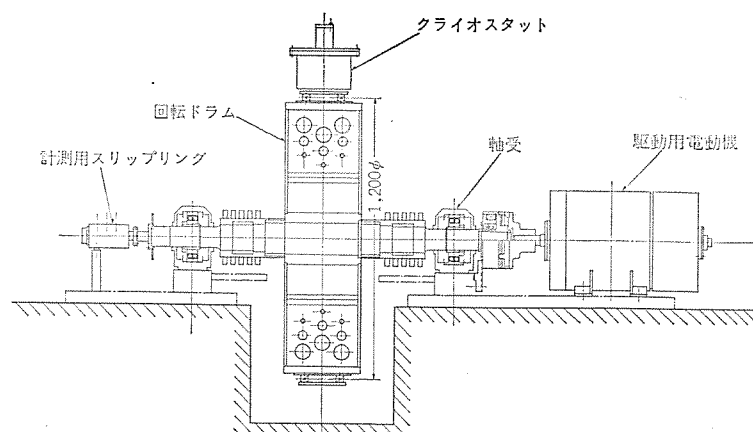


図 4.2 超電導磁気浮上動特性試験装置
Testing model of dynamic characteristics of superconducting magnetic levitation.

心より感謝の意を表します。（昭和 47-8-9 受付）

参 考 文 献

- (1) 奥, 京谷, 佐貫: 超高速新幹線, 中公新書 (昭 46-12)
- (2) K. Oshima, Y. Kyotani: Project of Magnetically Suspended Train in Japan, ICEC, (April, 1972)
- (3) J. R. Powell and G. T. Danby: High Speed Transport by Magnetically Suspended Trains, ASME, 66-WA/RR-5, (1967)
- (4) 浅越, 新良, 大野: 超高速鉄道の基礎研究, 三菱電機技報, 45, No. 4, (昭 46-4)
- (5) L. C. Davis, J. R. Reitz, D. F. Wilkie, R. H. Borcherts: Technical Feasibility of Magnetic Levitation as a Suspension System for HSGT Vehicles, FRA-RT-72-40, (Feb., 1972)
- (6) H. T. Coffey, F. Chilton, L. O. Hoppie: The Feasibility of Magnetically Levitating High Speed Ground Vehicles, FRA-RT-72-39, (Feb., 1972)
- (7) 山田, 岩本: 磁気浮上式超高速列車における浮上特性の理論検討, 電気学会論文誌, 92-B, No. 1, (昭 47-1)
- (8) T. Yamada, M. Iwamoto: Levitation Performance of Magnetically Sapsed High Speed Trains, Proc. of INTERMAG, 48-3, (April, 1972)
- (9) J. R. Powell, G. T. Danby: Magnetically Suspended Trains for very High Speed Transport, Proc. of IECEC, (1969)
- (10) H. H. Kolm, R. D. Thornton: The MAGNEPLANE, Guided Electromagnetic Flight, Applied Superconducting Conf, (May, 1972)
- (11) C. Guderjahn, S. L. Wipf: Magnetically Levitated Transportation, Cryogenics (June, 1971)
- (12) J. R. Powell, G. T. Danby: Magnetic Suspension for Levitated Tracked Vehicles, Cryogenics, (June, 1971)

オゾンによる染色排水処理

前田 満雄*・橋本雄二郎*・小沢 建樹*
今村 孝*・松岡 宏昌*・田畑 則一*

Ozone Treatment of Dyeing Waste Water

Central Research Laboratory Mitsuo MAEDA・Yujiro HASHIMOTO・Tateki OZAWA
Takashi IMAMURA・Hiromasa MATSUOKA・Norikazu TABATA

Recently waste water treatment with ozone has been worked out as industrial application. The ozone oxidizes and decomposes various pollutants in waste water such as cyan, phenol, odor and other materials. Also it decolors strongly dyeing waste water without producing sludge. Receiving a subsidy of the fiscal year 1971 from the Ministry of International Trade and Industry, Mitsubishi has completed and carried out field test, for the first time in the world, on an industrialized plant for the treatment of dyeing waste water as application of ozone reaction. It has a capacity of treatment of 100 m³/h in combination with coagulation process. Mitsubishi ozonizers thus developed are available in a series covering the capacity ranging from 4 g-O₃/h to 5 kg-O₃/h to help commercialize various plants of ozone treatment for waste water.

1. ま え が き

昭和46年6月24日に施行された水質汚濁防止法は、1年間の猶予期間を終り、いよいよ本年6月24日より水質基準の適用を受けることになった。

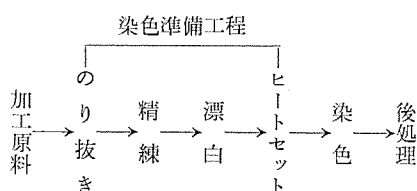
染色排水は着色濃度が高いことが特長で、また、この種の産業は比較的多量の水を使ういわゆる用水形産業であるために、排水処理施設には従来大きな敷地面積を要し、設備面積に余裕のない工場では、排水処理に苦慮している場合が多い。現在、染色排水処理の中でおもな処理対象となっているのは、SS、pH、BODなどの定められた水質基準のほかに脱色がある。いずれ排水の色規制も法的規制を受けるものと思われるが、従来の凝集沈殿処理などでは、十分な脱色は困難な場合が多い。

当社ではオゾンによる排水処理について技術開発を進めており、特に染色排水の脱色処理に有効であることから、昭和46年度より通産省補助金を受けて、(株)黒川工業 城陽工場と共同で、100 m³/hのなつ(捺)染排水のオゾン処理の工業化試験を行ってきた。その結果、実用性の高いことを確認し、実用設備の設計上に有益な知見を得た。

オゾンの排水処理への応用についてはすでに報告した⁽¹⁾が、本報告では特に染色排水のオゾン処理について報告する。

2. 染色排水の水質と特長

染色工程は、染色準備工程・染色・後処理の工程に大きく分類される。



のり抜き：製織時に付着したデンプン類などののり剤を除去するもので、腐敗法・酸浸漬法・酸素法などがあり、この工程からの排

水はBOD、COD、SSが高い。

精練：カセイソーダ法・石けんソーダ灰法などがあり、BOD、pHの高い水が排出される。

漂白：次亜塩素酸ソーダ法・亜塩素酸ソーダ法・過酸化水素法などがあり、塩素系化合物を用いる場合、脱塩素処理が必要であり、これには過酸化水素を用いるほかに、COD負荷成分となるハイポ、ハイドロサルファイトなどが用いられることもある。

染色：浸染法となつ染法とに分けられる。染料溶解剤（グリセリン、アルコール）・有機酸（蟻酸、酢酸）・のり剤・界面活性剤・無機塩類など多種成分を含み、着色物質BOD、COD、SSなどの汚濁成分を排出する。

したがって染色工場排水の特質として、

- (1) 排水の着色濃度が大きい。
- (2) 工程の流れに伴って水質の時間変動が大きい。
- (3) 染料のみでなくのり剤・界面活性剤・有機酸・無機塩など多種の成分を含んでいる。
- (4) 季節によって流行色などのために使用染料が変わり、排水の水質変動を受ける。

などがあげられる。

表2.1に染色工場排水の水質を示した。水質基準は、各都道府県でそれぞれ上乘せ基準を設けている所が多く、たとえば奈良県の大和川水域では、pHは5.8～8.6、SSは旧設工場では日間平均150

表 2.1 染色工場排水の水質
Quality of dyeing waste water.

工場	排水量 m ³ /日	pH	SS ppm	COD ppm	BOD ppm
A	300～350	5.89	60.2	142	73
B	1,500	5	—	120～200	200～400
C	500	7.3	3.4	133	151
D	400	7.5	7.0	79	15
E	1,500	6.95	3.5	93	150
F	200	4.75	40.5	163	226
G	300	5.55	14.2	584	545
H	3,000	6.5～11	100～140	170～200	230～500

理が行なわれる。この場合、前処理では排水中のSS分を取除くのが目的であり、脱色は目的としない。このために脱色用の高分子凝集剤などは特に必要としない。

図3.2にオゾン水処理装置の構成のブロック図を示した。オゾンは空気または酸素を原料とし、無声放電により得られる。得られたオゾン化空気はエゼクタまたはディフューザを通して気液反応そうに送られ、汚濁成分と反応する。処理後の排水は、気液分離そうで気液分離を行ない排出される。一方分離後の気体は、排オゾン処理装置で余剰オゾンを分解処理した後排気する。気液反応そうと気液分離そうとは一体化した構造にすることもある。必要に応じてオゾンモニタ、水質モニタをそなえ、水質変動に応じて発生オゾン量を制御することができる。

4. 汚濁成分とオゾンとの反応性

表4.1に染料のオゾンによる脱色試験結果を示した。これからわかるように、反応・カチオン・酸性などの親水性染料はオゾンとよく反応し、染料の単位重量当たりの脱色に要するオゾン量は1以下である。一方、分散染料の場合は1より大となり、必要オゾン量は大きくなる。染料の発色構造とオゾンによる脱色機構との関係は、赤外スペクトルなどから検討しており、一部は前報⁽¹⁾で報告した。染料の発色構造は、下記のような発色団によるためであるとする説や、分子内の共やく(軌)二重結合による共鳴混成体が、その根源であるとの説などがある。

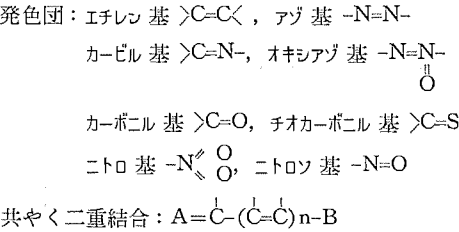


表 4.1 染料のオゾン処理結果 (池畑 昭)
Results of ozone-treatment for dyes (A. Ikehata).

染料			オゾン処理		凝沈処理	
分類	構造別分類	試料名	重量比 Os/dye	脱色率 %	Al ³⁺ ppm	脱色率 %
反応	モノアゾ、 ポリアゾ染料	C. I. Reactive Red 1	0.44	99.4	200	14.9
	金属錯塩アゾ染料	C. I. Reactive Blue 9	0.42	100	200	95.4
	ピラゾロンアゾ染料	C. I. Reactive Yellow 1	0.28	99.8	200	77.4
	フタロシアニン染料	C. I. Reactive Green 5	0.80	99.3	200	96.7
カチオン	アントラキノン 誘導体	C. I. Basic Violet 21	0.45	100		
	アジン染料	C. I. Basic Black 2	0.32	100		
酸性	ジスアゾ系	C. I. Acid Blue 59	0.55	98.9		
	金属錯塩アゾ染料	C. I. Acid Orange 122	0.88	99	100	41.1
	アントラキノン 誘導体	C. I. Acid Blue 129	0.24	100	50	99.9
	インジゴ誘導体	C. I. Acid Blue 74	0.42	100	200	79.1
直接	モノアゾ、 ポリアゾ染料	C. I. Direct Blue 78	0.9	100	100	99.6
	チアゾール アゾ染料	C. I. Direct Yellow 28	0.98	93.6	200	72.4
	オキサジン染料	C. I. Direct Blue 106	0.33	99.2	100	98.6
分散	アントラキノン系	C. I. Disperse Blue 3	1.68	97.2		
	モノアゾ系	C. I. Disperse Red 101	3.34	90.5		
媒染	ピラゾロンアゾ染料	C. I. Mordant Red 7	0.51	99.6	200	84.7
	モノアゾ染料	C. I. Mordant Orange 29	0.55	98.9	200	90.1

これらはいずれも不飽和結合を有しており、オゾンは不飽和結合と反応しやすく、そのためにオゾン酸化によりこれらの不飽和結合が酸化され、または分解されてその発色機能を失ない、脱色するものと考えられる。その結果、有機酸・アルデヒドなどを生成すると推定されている。

ただキノン構造については、オゾンによる直接酸化は受けにくく、キノン系染料については、キノン基以外の助色団などがオゾンにより分解されて、脱色すると考えられている。

つぎに染料の脱色におよぼす界面活性剤の影響について、実験を行なった結果を表4.2に示した⁽²⁾。親水性染料として Mikacion Brilliant Red 5 BS と Cibacron Green 3 G-P、分散系染料として Diacelliton Fast Brilliant Blue B-M/D を用い、界面活性剤として、サンモール A-100 (ノニオン系)、カラゾール ES (アニオン系)、モノゲン 170 (アニオン系)、サイゾール E (アニオン・ノニオン混合系) を用い、これらを組合せた溶液についてオゾン処理を行ない、脱色までの時間、COD 変化などを測定した。その結果、Dia. Fast Brill. Blue については、脱色速度に対する界面活性剤の影響はみられず、脱色までの所要時間はほとんど差がない。この染料は分散系であるが溶解度が比較的高く、オゾンとの反応性が高く、脱色所要時間も短い。一方、Cibacron Green および Mik. Brill. Red はオゾン通気により、原色は消えて黄だいいい色ないし黄色になるまでは早い、それから無色になるまでの所要時間は界面活性剤が共存する場合、染料単独の場合に比較して4~5倍の時間を要する。このことから染料がオゾン処理で発色構造を失なった中間体と界面活性剤との間で、オゾンに対する競合反応を伴い、完全脱色までの所要時間が長くなるものと思われる。一方、COD 変化については染料単独の場合、いずれもオゾン処理により半分以下に低下しているが、界面活性剤の共存下では逆に増大している場合もある。

表 4.2 染料のオゾン処理におよぼす界面活性剤の影響
(試料 200 ml, 注入 オゾン 25 mg/min)

Influence of surface active agents on ozone-treatment for dyes. (sample 200 ml, ozone injection 25 mg/min)

染料	界面活性剤	オゾン処理		COD (ppm)	
		脱色までの 所要時間 分	30分処理後の 消費量 mg	初期	30分処理
Cibacron Green 3 G-P (反応系) 50 ppm	—	3	14.2	31.3	10.3
	サンモール A 100 30 ppm	17	28.5	22.0	18.1
	サイゾール E 100 ppm	22	44.5	10.8	21.4
	モノゲン 170 20 ppm	18	24.5	9.4	15.5
	カラゾール ES 100 ppm	13	30.5	19.7	20.4
Mikacion Brilliant Red 5 BS Cake (反応系) 50 ppm	—	1.8	9.7	15.1	7.6
	サンモール A 100 30 ppm	8	25.5	16.3	20.2
	サイゾール E 100 ppm	13	—	19.2	19.1
	モノゲン 170 20 ppm	8.5	55.5	22.4	14.7
Diacelliton Fast Brilliant Blue B-M/D (分散系) 50 ppm	—	0.9	14.9	32.3	11.5
	サンモール A 100 30 ppm	1.0	66.5	38.3	25.8
	サイゾール E 100 ppm	1.3	80.5	45.6	24.2
	モノゲン 170 20 ppm	1.1	68.5	34.3	22.4

表 4.3 染色排水のオゾン処理結果
Results of ozone-treatment for dyeing waste water.

試料	処 理 条 件	pH	透 過 率 (530 mμ)	濁 度	COD	BOD
T	原 水	6.03	77 %	11.5 %		ppm 181
	O ₃ (52 g/m ³)		95	3.6		56.3
	加圧浮上+O ₃ (バンド 300 ppm)		95.2	0		36
Y	原 水	5.4	67	48.5		50
	凝集+O ₃ (PAL 300 ppm) (30.6 g/m ³)		96	7.6		18
H	原 水	7.25	72.6	14.8		150
	O ₃ (17.4 g/m ³)	7.45	86.4	8.4		132
	凝集+O ₃ (Al ³⁺ =28 g/m ³) (17.4 g/m ³)	8.05	93.3	3.1		72
S	原 水	8.2	60.5	22		223
	O ₃ (60 g/m ³)	7.2	95.6	0		17
K	原 水	4.8	0.5	0.38	413	
	O ₃ (453 g/m ³)	4.5	98.0	0.10	240	
	凝集+O ₃ (バンド 300 ppm) (344 g/m ³)	6.75	98.3	0.10	232	
I	原 水	6.7	65.6	26.2	201.6	
	O ₃ (173.6 g/m ³)	7.6	94.8	2.83	40.3	
TO	原 水	5.6	70.0	16.8	141.6	
	O ₃ (173 g/m ³)		90.5	1.13	69.8	
	凝集+O ₃ (バンド 500 ppm) (88 g/m ³)		99.3	0.71	53.4	

つぎに染料の脱色に及ぼす各種のり剤の影響についても、実験的検討を行ない、その結果をまとめているが界面活性剤の場合と似たような結果を示すものもある。また染料溶解剤であるグリシンAと直接染料である Diacupro Red との混合溶液では、その脱色過程にグリシンAの影響がみられた。

染色排水中には、これら各種界面活性剤・のり剤・染料溶解剤などのほか無機塩・有機酸なども含まれる。無機塩の中で還元性物質として、亜硫酸ソーダ・硫化ソーダ・ヒドロサルファイト・チオ硫酸ソーダなどがあり、これらはいずれもオゾンと反応する結果、これらが排水中に含まれると、見かけ上脱色に要するオゾン量を増大する原因となる。

表 4.3 に染色排水のオゾン処理による透過率・濁度・COD・BOD変化を示した。オゾン処理と凝集処理とを組合せると透過率・濁度ともに十分な値を示し、BOD, COD の除去効果も良いことがわかる。排水によってはオゾン処理で BOD, COD がかえって上昇する場合もあり、これはオゾンにより分子が切断されて低分子化合物になることによって、元来化学的・生物化学的に不活性であった化合物が、活性なものに変化したと考えられる。その機構は複雑であり、今後さらに検討を要する。しかし、この性質を逆用すれば、活性汚泥で処理できなかった物質も、オゾン処理をあらかじめ行なうことにより、活性汚泥処理が可能になることも考えられる。

5. 実規模装置による試験結果

当社では昭和46年度通産省補助金交付を受けて、(株)黒川工業

オゾンによる染色排水処理・前田・橋本・小沢・今村・松岡・田畑

城陽工場と共同で、排水量 100 m³/h のなつ染工場排水のオゾン処理の工業化試験を行なった。このテストプラントの紹介については前報⁽¹⁾で行なったので、ここでは試験結果の一部を報告する。

オゾナイザは OS-600 形を3台用い、オゾン発生量は定格 1.8 kg/h, 最大 2.4 kg/h である。処理システムは、既設の凝集沈殿処理装置とオゾン処理装置との組合せシステムである。

処理フローシートは図 5.1 に示したように、オゾン処理は2段処理を行なえるように第1段・第2段ばつ(曝)気そうで構成されており、オゾンは各段に平行し、ミリーズどちらにでも注入できるようになっている。排水は連続処理・循環処理ができるようにしている。制御はオゾンモニタ・色度モニタなどにより供給オゾン量を制御できるようになっている。原水はなつ染排水で、水質は表 5.1 に示したようにアルカリ性で、濁度が高く、BOD は 140 ppm 前後である。水質の時間変動を図 5.2 に示した。pH 変動は大きく 10 以上になることもあった。表 5.2 に実地試験の運転条件を示した。凝集剤は液体硫酸バンドを用い、フロックの沈降速度を上げるため、高分子凝集剤を併用した。注入オゾン量は 20 ppm 前後で、処理フローは図 5.3 に示したようなパターンで実験を行なった。

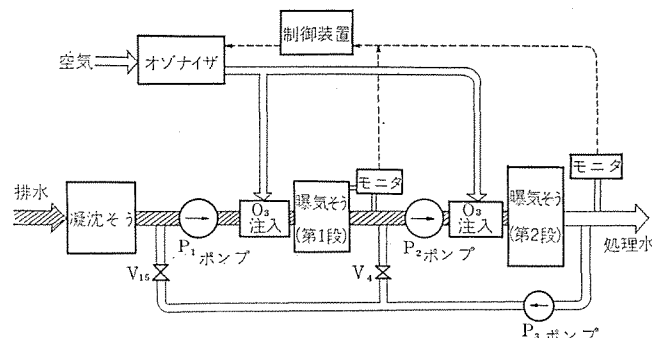


図 5.1 工業化試験プラントフローシート
Flow sheet of test plant for industrialization.

表 5.1 原水の平均的水質
Average quality of raw waste water.

項 目	平 均 的 値
pH	8.5~10
濁 度 %	40~50
ゼータ電位 mV	-30~-40
蒸発残渣 ppm	500~1,000
T O C ppm	400~500
B O D ppm	140 前後

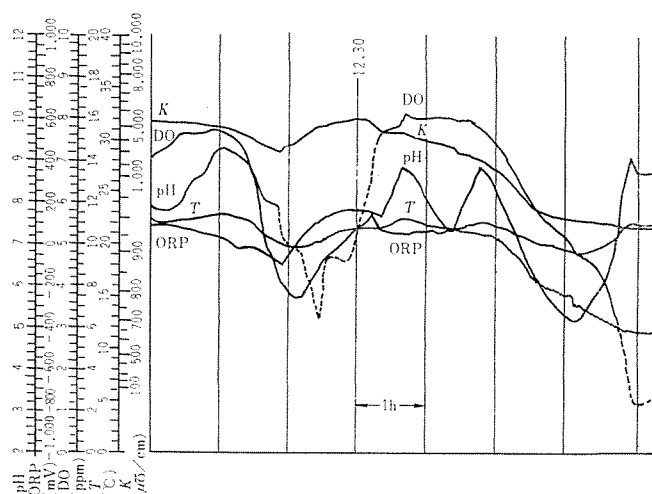


図 5.2 原水そうの水質変化 (47.4.17. 8:30~15:30)
Variation of waste-water quality in storage tank.

フロー A は、第1段ばっ気そうでのみオゾン処理を行なうものである。フロー B は、オゾンを経第2段ばっ気そう→第1段ばっ気そうへシリーズに通すものであり、フロー E はその逆、フロー C は、第1段・第2段ばっ気そうに平行に注入するもので、フロー D は、第2段ばっ気そうでのみオゾン処理を行なうものである。第1段ばっ気そうと第2段ばっ気そうとの構造は異なったタイプであり、第1段は鋼製で4m³容量で気液分離そうは別になっているが、第2段ばっ気そうは、コンクリート製のオートタイプのもので15m³容量のもの2台からなっている。図5.4は各フロー間の処理効果の比較を示すもの

表 5.2 実地試験条件
Practical test conditions.

項	目	運 転 仕 様	備 考
前 処 理 部	処 理 水 量	m ³ /h	100
	凝集剤注入量	ppm	180~300
	石 灰	ppm	200
	高 分 子 助 剤	ppm	2~4
オ ゾ ン 処 理 部	消 泡 剤	ppm	5
	処 理 水 量	m ³ /h	100
	オゾン注入量	g/m ³	平均 19~22
	気液比	フロー A, D	1.2
	気液比	フロー C	0.2
			フロー間で異なる

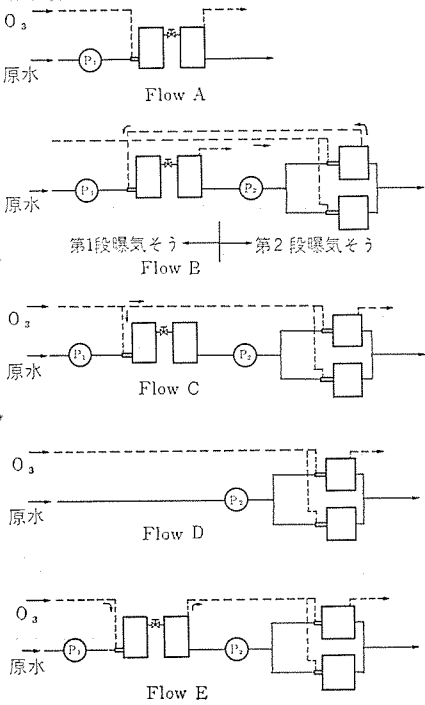


図 5.3 オゾン処理フローパターン
Flow pattern of ozone treatment.

表 5.3 染色排水処理結果 Results of treatment for dyeing waste water.

実 験 No.	流 量 m ³ /h		O ₃			処 理 結 果		蒸発残留物 ppm	T O C ppm	消 費 O ₃ /TOC
	オゾン化空気	処 理 水	発 生 量 g/h	消 費 量 kg/h	利 用 率 %	処理水透過率 %	全脱色率 %			
3-2-C-1	120/2	107	1.77	1.65	93.0	83.5	89.8	718	119	0.129
3-3-C-1	120/2	106	1.94	1.67	86.1	98.0	98.2	386	70	0.225
3-3-C-2	120/2	109	2.10	1.80	85.7	89.2	91.3	500	75	0.220
3-7-C-1	120/2	100	2.06	1.93	93.6	89.5	93.4	510	111	0.174
3-7-C-2	120/2	100	1.94	1.85	95.4	96.1	98.0	540	104	0.178
3-7-C-3	120/2	100	2.17	2.08	96.0	92.2	94.4	670	198	0.105
3-8-C-1	120/2	97	1.95	1.62	83.1	86.0	87.0	704	—	—
3-9-C-1	120/2	103	1.90	1.85	97.4	89.5	90.7	646	128	0.140
3-9-C-2	120/2	95	1.95	1.95	100	88.5	90.1	680	140	0.142
3-9-C-4	120/2	95	1.83	1.83	100	80	78.9	906	183	0.105
3-30-C-1	120/2	100	2.11	2.11	100	91.7	94.5	620	146	0.145
3-30-C-2	120/2	97	2.39	2.39	100	94.6	94.9	610	129	0.191
3-30-C-3	120/2	97	2.34	2.34	100	95.3	97.6	554	116	0.207

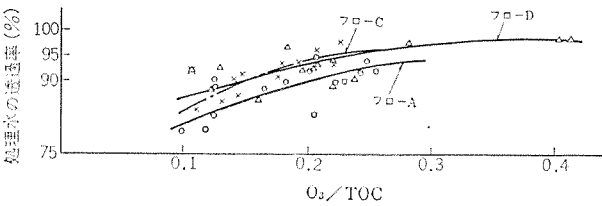


図 5.4 各フロー間の処理比較
Comparison of results of each flow.

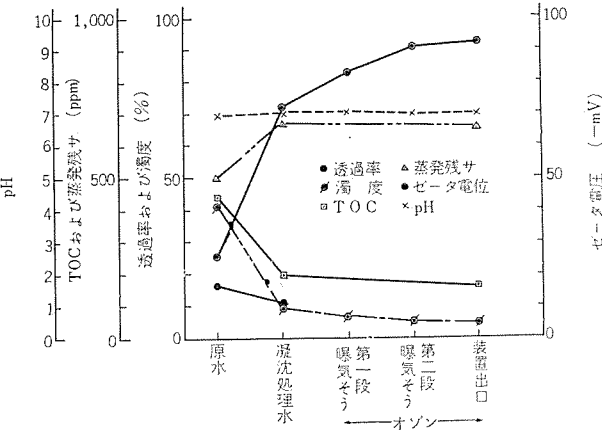


図 5.5 処理過程での水質変化
Variation of water quality under treatment.

で、注入オゾン濃度/TOC (全有機炭素) に対する処理水の透過率をプロットしたものである。これからわかるようにフロー C、D では $O_3/TOC \geq 0.2$ で、処理水の透過率は 95% 以上となっている。凝集処理水の TOC は 100 ppm 前後であり、このとき 20 ppm の注入オゾン量で透過率 95% の処理水を得る。表 5.3 にフロー C の場合の処理結果を示した。また図 5.5 に処理過程における水質変化の例を図示した。同図において原水の透過率 25% の排水は、最終処理水では 92.2% となり脱色率は 94.4% となっている。残留濁度(微フロックなど)が少し残っているため、透過率は低めに指示されているが、色は完全に無色である。

運転費は 20~25 円/m³ であり、このうちオゾン処理部は 3 円/m³ 程度である。

6. オゾナイザ容量の決定

オゾン処理を行なうに際してはオゾナイザ容量を求め、オゾナイザの機種を選択を行なうことが重要なチェックポイントである。染色排水処理のために、必要なオゾン量とオゾナイザ容量は次の式 (6.1), (6.2) で示される。

$$Q = (C/\eta) \cdot W \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

$$C = \sum_{i=0} \gamma_i \cdot X_i \cdot (O_3/R_i) \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

$$= \gamma_0 \cdot X_0 \cdot (O_3/R_0) + \gamma_1 \cdot X_1 \cdot (O_3/R_1) + \gamma_2 \cdot X_2 \cdot (O_3/R_2) \quad \dots\dots\dots (6.2)'$$

Q: オゾナイザ容量 (g/h)

C: 必要オゾン量 (g/m³)

η: オゾン消費比率

W: 処理水量 (m³/h)

γ_i: 競争反応比率 (染料とオゾンとの脱色反応速度を1としたときの、共存物質とオゾンとの反応速度比率)

X_i: 汚濁成分濃度 (g/m³)

(O₃/R_i): 汚濁成分の単位濃度当たりのオゾン消費濃度

i: 汚濁成分種(染料・のり剤・界面活性剤・塩類など)

実際には染色排水中の染料についても、一つの色調を染色するには多種の染料を配合しており、それらが排出されるために複雑であり、排水中の汚濁成分濃度を調べてオゾン容量を算出することは不可能に近い。したがって実排水をサンプリングし、水質試験を行なってオゾナイザ容量を決める。サンプリングするとき、特に注意すべき点はサンプリングの仕方である。原水ピットやすでに他の処理装置を有している場合は、ある程度水質は平均化されるので比較的良好だが、処理装置未設置の工場からサンプリングする場合は、水質の時間変動が極端に大きい場合が多く、非常に高濃度の染料が流されたと思うと、水洗工程などのように染料濃度が非常に低くなったりする。

したがって時間をかけて何回かサンプリングし、これらを混合し、平均的な水質とするか、あるいは現場実験を行ない、水質変動を把握してオゾナイザ容量を求める必要がある。

7. オゾンによる染色排水処理のフローシート例と経済性

カチオン系染料を主とする染色排水(合セン系工場)の処理フローシート例を図7.1に示した。排水量は1,500 m³/dayである。排水中のSS分、分散染料などは少なく、処理フローはシクナ処理とオゾン処理との組合せシステムである。設備費は約2,800万円であり、オゾナイザは定格1.2 kg/hのオゾンを発生するものである(三菱オゾナイザOS-1200D)。排水は300 m³の貯そうにためられ、ここからポンプアップしてpH調整そうに送られる。ここで、セシソーダの添加によりpH≈9に調整される。ついでコンディショナに送られ、ここで凝集剤および高分子凝集剤を加え、オーパフロー水としてシクナに送られる。ここでSSを凝集分離するが脱色は目的としないため、脱色用の高分子凝集剤は不要であり、ここで用いる高分子凝集剤は、フロックの沈降速度をあげるためのものである。したがってシクナ処理後の排水は有色透明であり、これを中間貯そうにためた後、エベクタを通してオゾンを吸入しながらバツ氣そうに送られる。ここでオゾン化空気と排水との気液接触により、脱色処理を行なう。この排水について予備テストを行なった結果は、原水のpH=6.95, BOD=150 ppm, 透過率=80.5%に対し、処理水のpH=7.2, BOD=78, 透過率=96.2%となった。

つぎに運転費について算出した結果を表7.1に示した。これによると運転費は約10円程度であり、その中オゾン処理部については電力費のみでよく、2円/m³以下となっており、残りの大部分は薬品費である。この排水は染色排水の中でも処理しやすい水質であるために、薬品費は約7.5円/m³と安価であるが、一般的にはもっと

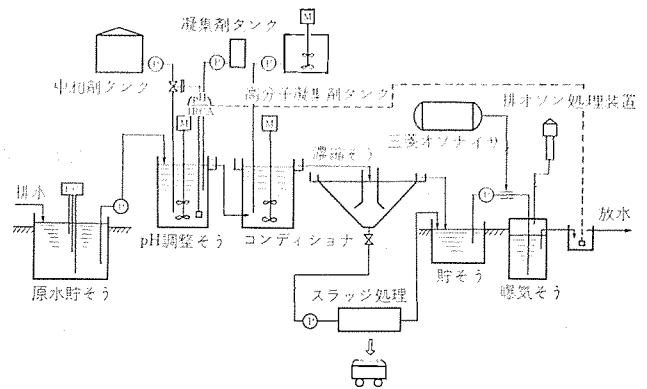


図 7.1 処理システムの概略フロー
Approximate flow diagram of treatment system.

表 7.1 染色工場排水処理の経済価格
Economical cost of treatment for dyeing waste water.

対 象	排 水	合セン系工場排水, カチオン染料が主体
処 理 水 量		1,500 m ³ /day
設 備 費		約2,800万円(前処理+オゾン処理)
オ ゾ ン ナ イ ザ		OS-1200形
運 転 費	薬 品 費	7.47 円/m ³
	NaOH	1.62 円/m ³ (54 ppm, 30 円/kg)
	P A C	5.00 円/m ³ (200 ppm, 25 円/kg)
	高 分 子 凝 集 剤	0.85 円/m ³ (1 ppm, 850 円/kg)
	電 力 費	2.72 円/m ³
	前 処 理	0.96 円/m ³ (32 kW, 4.5 円/kWh)
	オ ゾ ン 処 理	1.76 円/m ³ (58 kW, 4.5 円/kWh)
	合 計	10.19 円/m ³

薬品費がかかる場合が多く、なっ染排水などではこの2倍以上の薬品費を要することもある。

以上の例は、凝集処理とオゾン処理との組合せシステムであるが、活性炭処理とオゾン処理との組合せによるスラッジレスシステムについても、具体的検討を進めている。

8. む す び

染色排水のオゾン処理は脱色効果のすぐれた処理方法であるが、硫化系染料を含む排水には必ずしも有効ではなく、またクロムを含むような場合はクロムイオンの色が残り、これらは別途処理を行なう必要がある。染色排水は多成分の汚濁物質を含んでいるので、工程別に排水経路を分けて処理するほうが、効率的な場合も考えられる。

またオゾン処理の特長をさらに生かした処理システムの検討も、今後進めていく必要がある。

最後に染色排水処理についてご指導願っている、工業技術院北海道工業開発試験所 池畑昭氏、京都府中小企業総合指導所 八木永治氏、京都市染色試験場 本馬達夫・山田博の両氏、および共同研究先である(株)黒川工業 城陽工場社長 川端勇作氏、ならびに本実験に協力下さった関係者諸氏に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 松岡, 田畑, ほか: 三菱電機技報 46, 552 (昭47)
- (2) 松岡, 前田, ほか: 第9回下水道研究発表会予稿集

レーザ レーダによる排煙流の観測と SO_2 濃度の測定

中原 昭次郎*・伊東 克能**・伊東 尚**

Observation of Stack Effluent and Measurement of SO_2 Concentration with Laser Radar

Kamakura Works Shôjiro NAKAHARA・Katsuyoshi ITO・Shô ITO

This is a supplementary report to Monitoring Laser for Public Hazard in the special number (Vol. 46 No. 5) for environment control, describing chiefly the measurement of SO_2 concentration in stack effluent through the improvement of a spectrometric system such as filtering and a signal processing circuit, and observation of the effluent referred to based on experiments.

As for Mie scattering, a limit of measurable distance to be determined by the scattering of atmosphere has been sought for from observation results. In regard to Raman scattering, it has been successful in measuring SO_2 concentration in actual stack effluent. As is explained this laser radar is capable of measuring with one set the SO_2 concentration of the effluent and the effective height of chimneys so as to judge whether smoke meets the standard of SO_2 discharge or not. Thus, it has been proved of high value as a monitoring device.

1. ま え が き

幅広いレーザの応用のなかで、レーザレーダはレーザの持つ多くの特色を生かした重要な応用の一つで、裾の広い技術分野を形づくるようになった。すでに固体目標とレーザの間の距離を測定しようとする測距装置は、開発を完了し、今日の開発対象は大気汚染など公害監視システムの中で、センサとして重要な役割をはたすミイ散乱によるレーザレーダや、ラマン散乱あるいは共鳴吸収によるレーザレーダに移っている。前者すなわちミイ散乱によるレーザレーダは、散乱断面積の比較的大きいミイ散乱によって、排煙の拡散状況やスモッグの発生状況を検出しようとするものであり、ラマン散乱あるいは共鳴吸収によるレーザレーダは、大気中の特定分子によるラマン散乱や、共鳴吸収によってその濃度測定をしようとするものである。これら異なった測定原理による測定技術が確立されれば、汚染物質の発生源から拡散の様子や環境濃度がわかる訳で、その開発は大気汚染の進行が著しい今日、最も緊急度の高いものとなっている。



図 1.1 レーザレーダ排煙観測車
Mobile laser radar for stack effluent monitoring.

当社では、これまでにミイ散乱によるレーザレーダや、ラマン散乱により SO_2 の排出濃度を測定するレーザレーダ、および共鳴吸収により NO_2 と SO_2 の環境濃度を測定するレーザレーダを開発しており、前二者については前回の報告でその設計法と予想性能を中心に報告した⁽¹⁾。この報告はそれに続くもので、フィルタや信号処理回路を改良することにより、排煙中の SO_2 濃度の測定に成功したので、実験結果を中心に報告する。なお、本装置は昨年度1年間にわたって全国各地で、観測業務をおこなってきており、排煙流の観測についても多くの結果を得ている。図 1.1 は観測状況を示す写真であるが、このような測定の結果を元にして、ミイ散乱によるレーザレーダでは、大気の散乱がおもな要因として決まる測定可能な限界距離を求めたので、それについても説明する。

2. 実 験

2.1 ミイ散乱による排煙流の観測

光の散乱現象の中で最も散乱断面積の大きいミイ散乱を利用して、煙の拡散の諸要素（煙突の有効高さや拡散幅）を調べることができる。特に、煙突の有効高さの測定は、法律で定められた排出規準に適合するか否かの判定に役立つものであって、監視という点から重要な要素である。

ミイ散乱光の波長は照射するレーザ光と同じで、散乱光強度も大きい。ため装置の基本構成は図 2.1 に示すように簡単である。送信望遠鏡は、レーザ光を平行性良く目的とする方向に照射するためのもので、レーザ光のひろがり小さければ口径は小さくてよい。受信望遠

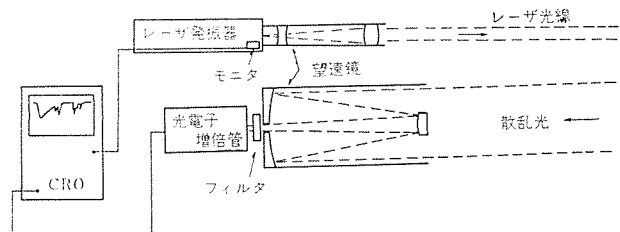


図 2.1 ミイ散乱レーザレーダの基本構成
Schematic diagram of laser radar utilizing Mie scattering.

鏡は散乱光をできるだけ多く集め、干渉フィルタを通して光電子増倍管に入射させるためのもので、有効径を大きくし、鏡筒を短くするためにカセレン反射望遠鏡を用いている。干渉フィルタは、散乱光を背景光から分離して S/N 比良く受信するために必要であるが、透過帯域幅と受信望遠鏡の F 数は、整合がとれていなければならない。

図 1. 1 に示した装置では、

送信望遠鏡： 口径 $D_t=8$ cm, 透過率 $T_t=0.79$

受信望遠鏡： 口径 $D_r=50$ cm, 透過率 $T_r=0.62$

干渉フィルタ： 透過帯域幅 $\Delta\lambda=20$ Å, 透過率 $T_f=0.58$

である。受信望遠鏡の口径が $D_r=50$ cm と大きいのは、このレーザ装置のもう一つの機能である ラマン 散乱によるレーザレーダからの要求で、ミイ散乱によるレーザレーダだけでよい場合には、送信望遠鏡のものの 2 倍程度で十分な性能が得られる。

受信信号の表示方法としては、光電子増倍管の出力をブラウン管上に A スコープ表示するのが最も一般的で情報量も多く、煙の拡散幅や最高濃度などの値を求める際に有利である。これに対し、RHI 表示や PPI 表示では、煙流の断面形状や平面の形状をブラウン管上に輝点の連続として描くものであって、一目で煙のひろがりの様子がわかる利点がある。しかし、表示法としてこれらの方法を採用しデータに定量性をもたせようとするときには、単に R^{-2} 補正のほかには大気散乱による減衰も補正しなければならない。そのためには磁気メモリなどの記憶素子と演算素子が必要になる。 R^{-2} 補正だけのものでは、大気散乱係数が大きい（視界が悪い）工業地帯などで装置を使用する際に不都合が目立ち、煙流のうち濃度の高い部分をひろい出したようになる。その結果、拡散幅やこの値を用いて計算した濃度などに誤差を生ずることになる。図 1. 1 に示した装置では、信号の表示法として A スコープ表示を用い、記録法としては、ブラウン管上の波形を測定時刻、仰角および方位角などと一緒に写真に取る方法を採用している。

次に、図 1. 1 に示した装置を使用して測定した排煙の拡散状況を図 2. 2 と図 2. 3 に示す。測定の対象とした煙は重油燃焼のボイラの排煙で、電気集じん装置を通り、高さ 160 m の煙突から排出されたものである。この煙の透明度は高く、煙突の出口付近でもわずかに白色にみえる程度（明るい部分に向ってながめた場合には、幾分か出口付近が暗く感じられる）のものであるが、この濃度は今日の法律の規制の下では、重油燃焼のボイラの煙としては一般的である。測定時の気象条件は、風速：3～5 m/s、天候：薄曇、測定時刻：9～13 時、大気安定度：弱安定～不安定、視程：5～10 km であった。測定の結果、煙流の追跡は煙突の風下側に 1 km 以上可能であるが、拡散幅を求めるなどの処理をするのに十分な S/N （少なくとも 3 以上）を確保して、測定できるのは風下側 500～1,000 m に限られることが多い。

測定限界がこのような小さな値に制限されてしまう理由は、観測日の視界が悪く、大気の後方散乱係数が大きいこと、煙によるエコーが、背景の大気によるエコーの変動とショット雑音に埋もれてしまうことである。工業地帯でも周囲の工場との距離が十分にある場合、あるいは、気象条件の差などによって視界が良い場合ならば、同一濃度の煙を対象にした場合でも測定限界は上述の値の 3 倍以上になることが可能である。しかし、これまでの測定の結果では、限界距離をきめる要因は、大気透明度の低さ（視界の悪さ）であることが多かった。このことは相対的に煙の透明度が高いということになる。

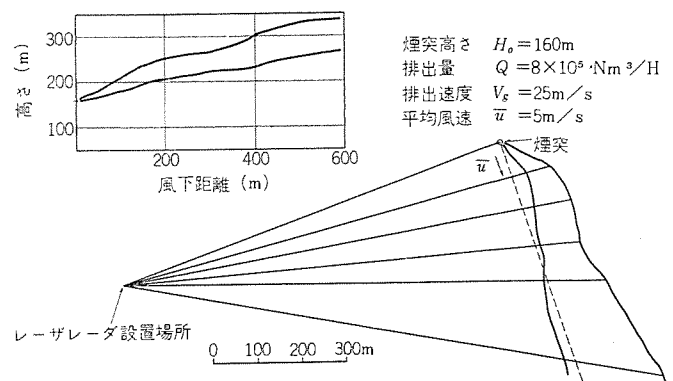


図 2. 2 ミイ散乱による排煙流の観測 (1)
Observation of stack effluent by Mie scattering (1).

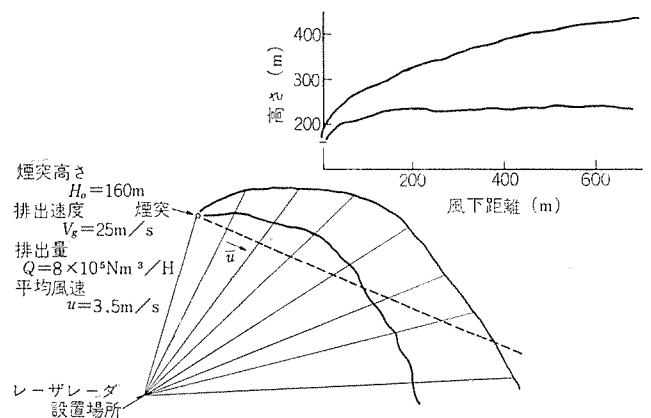


図 2. 3 ミイ散乱による排煙流の観測 (2)
Observation of stack effluent by Mie scattering (2).

大気散乱によって排煙流の観測距離が、どのように制限されるかをもう少し詳しくのべることにする。

大気散乱係数 $\beta \text{ m}^{-1}$ と視程 $V \text{ m}$ の関係は、両者の積が識別可能な最低の対比を与える量として結びつけられている。

$$\beta \cdot V = 3.91 \dots\dots\dots (2.1)$$

式 (2.1) より、 $V=7.8 \text{ km}$ とすると $\beta=5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ となる。したがって、もし煙が拡散してその散乱係数が、 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ となってしまうと受信信号は大きくとも、煙による散乱なのか大気散乱なのかを区別できなくなって、測定不可ということになる。それでは実際の煙の散乱係数は、煙突の出口付近でどのくらいの大きさで、それがどのように拡散するかを、図 2. 2 と図 2. 3 の測定対象となった程度の規模の煙突を例として考えることにする。

標準状態に換算して 1 時間当たりの排ガス量が $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 以上の煙突は、ばいじんの排出濃度が最もきびしく規制されているため煙の透明度は高い。後にのべるレーザラマンレーダを使用した測定でも明らかになるが、煙の散乱係数は、煙突の出口付近でも $\beta_0 \leq 2 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ である。つぎに拡散の様子であるが、煙が標準的な風速 $u=6 \text{ m/s}$ の風で拡散されるものとする、風下側に x 軸をとり、 x 軸に垂直な水平面内で y 軸を定め、鉛直方向に z 軸をとると、 y 軸と z 軸方向の拡散幅 σ_y, σ_z は、

$$\sigma_y = 0.33x^{0.875} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\sigma_z = 0.05x^{0.875} \dots\dots\dots (2.3)$$

で比較よく表わされる。ゆえに、煙突から風下側に測った距離 x を平均風速の 100 倍の 600 m とすると、 $\sigma_y=90 \text{ m}$ 、 $\sigma_z=14 \text{ m}$ となる。したがって、この付近での煙の散乱係数の平均的な値は、排ガス量を $Q=8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ として

$$\beta = \beta_0 Q / \pi \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u$$

$$\approx 2 \times 10^{-3} \text{m}^{-1} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

となる。この値は視程が 7.8 km とした際の大気散乱係数の 4 倍で、その程度のよごれの状態では、十分な S/N で煙を測定できることを示している。同じ気象条件の下で、さらに風下側にまで測定を続けた場合の追跡限界 ($S/N \approx 1$) となる距離は、排煙が希釈されて散乱係数が大気散乱係数と等しくなる風下距離である。視程が 7.8 km の場合に式 (2.4) によってその値を求めると、 $x=1,300 \text{ m}$ となる。これらの値は、図 2.2、2.3 の実験結果とよく一致しており、大気散乱が限界距離を決める主要な要因であることを示している。

上述、大気散乱以外で測定限界を決める要因と、その要因で決まる受信最小電力は、

(1) 検出器の発生する雑音

$$P_{ND} = \sqrt{B P_E} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

(2) 背景光 (太陽光の散乱) による雑音

$$P_{NB} = \pi \cdot T \cdot T_r \cdot T_f \cdot \lambda_i \cdot \theta_R^2 \cdot A_r \cdot N(\lambda_L) / 4 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

(3) レーザ光エネルギーの粒子性 (光電流のショット雑音)

$$P_{RES} = B h_L / \eta \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

(4) 検出器の負荷抵抗に生ずる電圧の最低値で決まる値

$$P_V = (h_L / \eta e G) \cdot (V_{\min} / R_L) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

である。ここで、式 (2.5)～式 (2.8) に表われる記号の意味と代表的な値は下記のとおりで、それらを代入して求められる受信最小電力は、式 (2.9)～式 (2.12) に示す値である。

B : 受信帯域幅	$3 \times 10^7 \text{ Hz}$
P_E : 検出器の等価雑音入力	$5 \times 10^{-15} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$
T : 大気透過率	1
T_L, T_r : 送受望遠鏡の透過率	0.8, 0.6
T_f : フィルタの透過率	0.6
λ_i : 干渉フィルタの透過帯域幅	20 \AA
θ_R : 受信望遠鏡の視野	$2 \times 10^{-3} \text{ rad}$
A_r : 受信望遠鏡の面積	
$N(\lambda_L)$: レーザ光の波長での空の輝度	$9 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2 \cdot \mu \cdot \text{str}$
h_L : 光子のエネルギー	$3.7 \times 10^{-19} \text{ J}$
η : 検出器の量子効率	0.1
e : 電子の電荷	$1.6 \times 10^{-19} \text{ q}$
G : 検出器の増倍率	6×10^4
R_L : 負荷抵抗	$500 \text{ } \Omega$

受信電小電力は

$$P_{ND} = 2.7 \times 10^{-11} \text{ watt} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$P_{NB} = 2.0 \times 10^{-7} \cdot A_r \text{ watt} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

$$P_{RES} = 1.1 \times 10^{-10} \text{ watt} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$P_V = 5.0 \times 10^{-9} \text{ watt} (V_{\min} = 5 \text{ mV}) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

である。

ここで、受信望遠鏡の面積を $2.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ とし (カセグレン形式の望遠鏡とした場合に口径は 20 cm 程度になる)、レーザ出力 P_0 をパラメータとしたときの検出可能な距離 R と最小散乱係数 β_{\min} の関係は、距離 R にある煙からの受信信号 $P_r(R)$ が、式 (2.9)～式 (2.12) のうちで最大の P_{NB} よりも大きくならねばならないという条件より求められる。ここで、 $P_r(R)$ はレーザ光のパルス幅を τ とすると式 (2.13) で与えられるから、

$$P_r(R) = P_0 C \tau \beta K A_r e^{-2\beta R} / 8 \pi R^2 \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

ゆえに、上述の条件は

$$\beta P_0 e^{-2\beta R} / R^2 \geq 6.1 \times 10^{-6} \text{ watt/m}^3 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

である。 P_0 に本装置の発振出力 10^6 W を代入して β と R の関係を求めると、 $\beta = 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ のとき $R = 2.5 \text{ km}$ のところからでも、大気のエコーを受信できることがわかる。これが装置の限界距離である。

結論として、測定をおこなう工業地帯での視程は高々 10 km であるから、測定限界距離は大気散乱係数によって定まり、その値は風下距離にして 1 km 程度である。装置の限界距離が十分あることから、上述の値は観測装置と煙突間の距離にほとんど無関係な値と結論できる。

2.2 ラマン散乱による排煙中の SO_2 の濃度測定

ラマン散乱は、分子に光が照射されたとき、分子の固有振動にひとしい振動数だけ周波数の異なった光が散乱される現象をいう。レーザラマンレーダは、この散乱現象を利用して排煙中の SO_2 などの有害物質を単一のフロー光で遠隔地より測定しようとする装置である。観測波長は個々のガスの一次ストークス線で、照射光を $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ レーザの第 2 高調波 $5,320 \text{ \AA}$ とした場合、 SO_2 のラマン散乱光は $5,667 \text{ \AA}$ 、 CO_2 は $5,711 \text{ \AA}$ 、 $5,744 \text{ \AA}$ 、 N_2 は $6,071 \text{ \AA}$ となり、適当な分光系を使用すれば各散乱光を分離することが可能である。

しかし、ラマン効果の散乱断面積は上述の 3 種類のガスで $10^{-35} \sim 10^{-34} \text{ m}^2/\text{str}$ と非常に小さいため、受信光強度は前節のミイ散乱光に比較して 10^{-9} 以下の微量となる。このことは、光検出器、受信信号の処理方法の選択や使用時間などに強い制限を加えるばかりでなく、レーザ発振器の高出力化や受信望遠鏡の大形化などを必要とするなど、装置の製作に当たって高度の技術を要求することになる。

測定しようとするガスのラマンシフトと照射光を、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ レーザの第 2 高調波とした場合のラマン散乱光波長、および散乱断面積⁽²⁾を表 2.1 に示す。

レーザラマンレーダの設計上の要点となるレーザの選定法やラマン散乱光の分光法、あるいは同期光子計数法と呼ばれる信号処理方式と回路の設計法の詳細については、文献(1)を参照していただくこととし、ここでは後の記述に便利のように、製作した装置の各部の性能

表 2.1 SO_2 、 CO_2 、 N_2 のラマン散乱光の波長
Raman scattering wave length of SO_2 、 CO_2 and N_2 .

	ラマンシフト cm^{-1}	波 長 \AA	散 乱 断 面 積 m^2/str
SO_2	1,151	5,667	1.24×10^{-34}
CO_2	1,388, 1,286	5,744, 5,711	$(0.337, 0.225) \times 10^{-34}$
N_2	2,331	6,071	0.225×10^{-34}

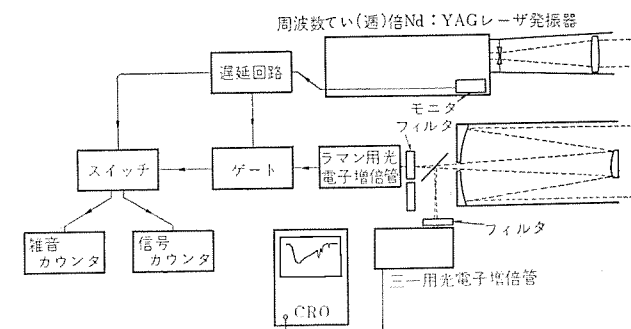


図 2.4 レーザレーダ排煙観測車のブロック図
Schematic diagram of mobile laser radar for effluent monitoring.

と排煙中の SO_2 濃度測定に関する実験結果を詳しくのべる。装置の構成を図 2.4 に示す。

検討の結果は、

- (1) 光源は、 Nd^{3+} : YAG の第 2 高調波が良い。ただし、高調波出力は、パルス 当たり 10 mJ、発振のくり返しは 40 Hz 以上とする。
- (2) 受信光学系は、口径 50 cm のカセグレン望遠鏡が良い。
- (3) 分光手段は、干渉フィルタが良い。
- (4) 検出法は、背景光による計数値を差し引けるようにした、同期光子計数法が良い。

2.2.1 装置の性能

検討結果の分類にしたがい 4 項目に別けて説明する。

(1) 光源

Nd^{3+} : YAG レーザの第 2 高調波で、波長は $5,320 \text{ \AA}$ の緑色光である。高調波出力は 10 mJ、パルス幅は 15 ns、発振のくり返しは 40 Hz である。励起エネルギーに対する高調波出力の割合、つまり光源の励起効率は 0.07 % に達する。光源の寿命は、上記出力で発振させた場合でも 5×10^6 回を越えており、発振ごとの高調波出力の変動は、 $10 \pm 1 \text{ mJ}$ であって非常に安定性の良いものである。高調波ビームのひろがり角も回折効果で決まる限界値に達しており、発振スペクトルも狭い。 SO_2 ラマン散乱光と CO_2 ラマン散乱光が接近していることを考えると、発振スペクトルが狭いことは光源としての必要な条件である。また、YAG レーザは、レーザーロッド・反射鏡・非線形結晶・励起ランプなど関連した材料や技術の開発が進んでいることも、見逃せない重要な利点である。

(2) 光学系

送受望遠鏡の結合を小さくして微弱なラマン散乱光を S/N 比よく測定するため、おのおのを独立の望遠鏡とした。受信望遠鏡の口径は 50 cm で、有効面積は 0.165 m^2 である。

(3) 分光系

分光装置としては、排煙中の水蒸気や粉じん(塵)などによるミイ散乱光を十分に除去できるもの、近接した波長にある他のガスのラマン散乱光を分離できるもの、微弱な SO_2 ラマン散乱光を検出できる光学効率の良いものでなければならない。これが一般的なラマン分光用の分光系に対する要求であるが、車載形のレーザーダの場合には、これに加えて小形堅固で振動に強いこと、口径が大きいことの要求が加わる。

特に、最後に記した大口徑ということは、焦点距離の長い受信望遠鏡を必要とするレーザーラマンレーダに不可欠な要素である。分光器の入射口を円形にできるか否かは分光器の分解能で決まるのだが、もし、細長いスリットであると、受信視野もスリットのように(矩)形となり非常に使い勝手の悪いものになってしまう。

受光部、特に分光系を構成する素子の配置と光学特性を表 2.2 に示す。

ラマン散乱によるレーザーダの分光系に、必要な条件についてのべる。

(a) ミイ散乱光の除去が十分にできるものでなければならない。

対象となる煙が 2.1 節で述べたように透明度の高いものであっても、レーザーラマンレーダは、煙突の出口付近を 200 m という至近距離からねらうため、受信望遠鏡に入射するミイ散乱光の強度は、0.1 ~ 1 watt となる。これに対し、 SO_2 のラマン散乱光は、 10^{-11} ~ 10^{-10} watt にすぎないから、分光系の透過率はラマン散乱光の波長とミイ散乱光の波長で 1 対 10^{-11} 以上の比にならなければ、測定できない

表 2.2 レーザダの光学的特性
Optical characteristics of mobile laser radar.

	SO_2 5,667 \AA	N_2 6,073 \AA
光 学 効 率	0.048	0.141
1. 送信光学系	0.79	
2. 受信光学系	0.64	
3. ビームスプリッター	0.90	
4. リジェクションフィルタ-1	0.60	0.55
5. 干渉フィルタ	0.44	0.90
6. リジェクションフィルタ-2	0.41	0.64
実効量子効率 $\eta \cdot K'$	0.082	0.069
ラマン散乱断面積 $10^{-34} \text{ m}^2/\text{str}$	1.24	0.225

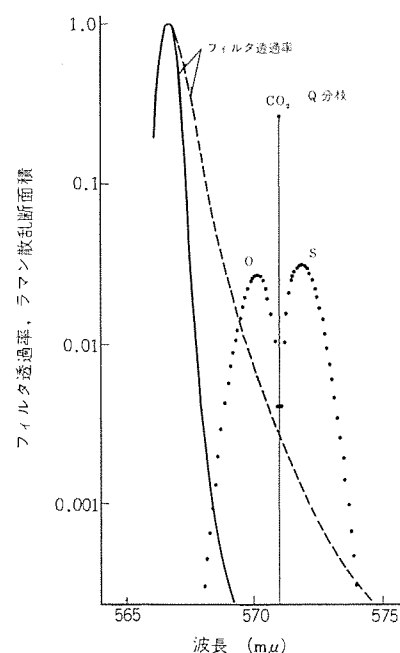
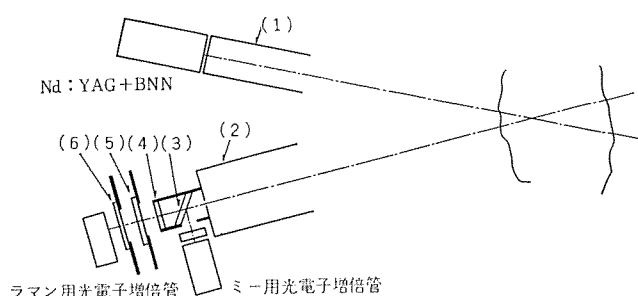


図 2.5 CO_2 ラマン散乱光のスペクトルとフィルタの透過特性
Raman spectrum with CO_2 and transmission curve of filter

ことになる。表 2.2 の系ではリジェクションフィルタ-1、干渉フィルタ、リジェクションフィルタ-2 のように 3 群のフィルタを組み合わせることにより、13 けた以上の減衰比を得ている。

(b) CO_2 や N_2 など排煙中に多量に含まれるガスのラマン散乱光と、 SO_2 のラマン散乱光が分離できなければならない。

重油燃焼ボイラを空気比 1.1 で稼働させたとき、煙突の出口におけるガスの濃度比率は、窒素が最も高く 70~75 % を占め、これについて CO_2 が 12~13 %、以下 H_2O : 11~12 %、 O_2 : 3~5 % であるといわれている。これに対し、いま測定しようとする SO_2 の濃度はわずかに 1,000 ppm 前後で、 CO_2 との比は 1/100 以下にすぎない。ところが、 CO_2 のラマン散乱光は、 SO_2 のラマン散乱光の 44 \AA 長波長側に位置し、しかも、短波長側に回転準位 0 分岐が裾をひ

いているために、ミイ散乱光の除去と同様に、CO₂のラマン散乱光に対しても十分な除去が必要になる。図2.5はSO₂とCO₂のラマン散乱光スペクトルと、干渉フィルタの透過率曲線を示したものである。図中、実線は表2.2に示した干渉フィルタの透過特性であり、破線は透過帯域幅の広い別のフィルタの特性である。もし実線で示す透過特性を持つフィルタを用いると、排煙中のSO₂濃度が30ppmでS/Nが1になるのに対し、破線のものではCO₂ラマン散乱光に対する減衰比が1/100となり、S/Nが1となる排煙中のSO₂濃度は、3,000ppmと実用上意味のない値になってしまう。実線のフィルタの減衰比を、刻線数1,200本/mm、焦点距離50cmの回折格子分光器で達成しようとする、スリット幅を0.1mm以下にしなければならず、長焦点の受信望遠鏡を使用しなければならないレーザレーダでは、非効率な受信系となり、使いものにならない。

(4) 信号処理系

排煙中のSO₂によるラマン散乱光の強度は、光電子増倍管の入口で10⁻¹¹~10⁻¹²wattになるから、検出方式としては光電子計数法を採用しなければならない。このため、管の選択にあたっては、光電面の量子効率の良いもの、光電子パルスの波高分布が暗電流パルスの波高分布よりも高電圧側に片寄っているもの、電流増幅率が高いもの等を考慮して選択する必要がある。図1.1の装置では以上の点を勘案して、RCA 4526を採用した。この管の光電子パルスの波高分布は高電圧側に片寄っておらず、暗電流による光電子パルスと同じ波高分布であって分離できないが、電気的な雑音は適当な利得の増幅器を使用して、パルスの振幅を増せば量子効率をあまり下げないでも信号と分けることができる。

一般に、工場内部の煙突より排出される煙は、高圧水銀灯などの照明光を反射してずいぶん明るく見えるものである。その輝度は周囲の様子でたいそうちがっているものと思われるが、われわれのこれまでの測定では5,667Å付近で10⁻⁷W/μ·str·cm²程度で、ラマン散乱光に対し無視できる値ではない。そのため、信号処理系としては、光電子増倍管の出力パルスのなかから煙の明るさによる部分を引き去ることのできる機能を、そなえたものでなければならない。

ここでは、まったく同じ特性を持つ二つのカウンタを用意し、一方のカウンタは排煙によるSO₂ラマン散乱光を計数するようにゲートを開き、他方のカウンタはそれよりも10μs後にゲートを開いて計数させるようにした。後者のカウンタは煙よりも1.5km後方のSO₂ラマン散乱光を測定することになるが、そのような遠方のSO₂濃度は無視できるので、計数値はレーザ光の照射に関係なく常に発生している光電子、つまり暗電流と背景光による光電子ということになる。ラマン散乱光の光電子数は、前者の計数値から後者の計数値を差し引いた値となる。

2.2.2 ラマン散乱によるN₂およびSO₂濃度の測定

(1) N₂ラマン散乱光の測定

大気中どこでもほとんど一定の濃度で存在する、N₂のラマン散乱光の測定は多くの意味をもっている。その中で最も基本的なものは、装置が正常に動作しているか否かを、検定するための標準サンプルとしての働きであり、SO₂濃度を測定する際の基本データとなる。この他に、大気の散乱係数を遠隔地より正確に求めることができる、煙などの透過率を正確に遠隔測定可能である等ミイ散乱を用いては、定量化や絶対値を求めることが難しかった光学的な量を測定できる。また、単に光学的な量に限られることなく、上空や遠隔地の温度や気圧などの基本的な物理量を測定できるものであり、測定距離も地

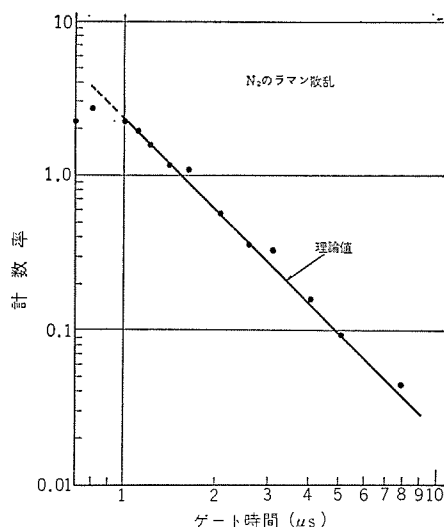


図2.6 大気中の窒素によるラマン散乱光強度
Detected Raman scattering signal from N₂ in the atmosphere.

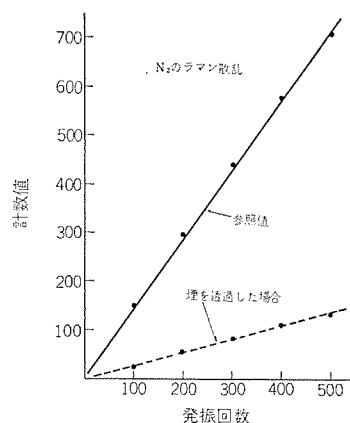


図2.7 窒素のラマン散乱光による煙の透過率の測定
Measurement of plume transmission by the N₂ Raman scattering signal.

上1kmに達する。この測定結果は、ミイ散乱による測定結果と相補的であり、逆転層やスモッグがしばしば発生する低空大気に関する多くの情報を与えるものである。ただし、これまでのところ開発されたレーザ装置の発振波長は可視域から近紫外域であるので、測定時間は背景光の少ない夜間に限定される。しかし、送信光をNd³⁺:YAGの第4高調波とするなどの改良を加えれば、背景光の影響をうけない紫外域に波長を移せるので、昼間でも測定可能な装置とすることができよう。

図2.6は、視界が良い冬の夜に測定したN₂ラマン散乱光強度の距離依存性である。図の横軸は、レーザ光が発射されてから散乱光が受信されるまでの時間で、縦軸は、150nsのゲートを通して計数された光電子の計数率である。図から明らかなように、大気伝ば(播)中の吸収や散乱による減衰が無視できて、散乱光強度は、距離の-2乗に依存して減少する様子が明らかに示されている。また、計数される光電子の数も下記式(2.15)で与えられる理論式と非常によく一致している。

$$N_e = \eta_{\text{eff}} \cdot n_0 K A_r \cdot T(\lambda_0) \cdot T(\lambda_R) L \cdot \bar{N}(R) \cdot \sigma_R / R^2 \dots (2.15)$$

ここで、N_eは光電子の計数率、η_{eff}は、光電子増倍管への入射光子数に対する計数された光電子数の割合で、光電子の電圧分布とカウンタのゲート電圧によるゲート通過率を考慮した量子効率である。Kは光学系全体の透過率である。Lはカウンタのゲート幅150nsに相

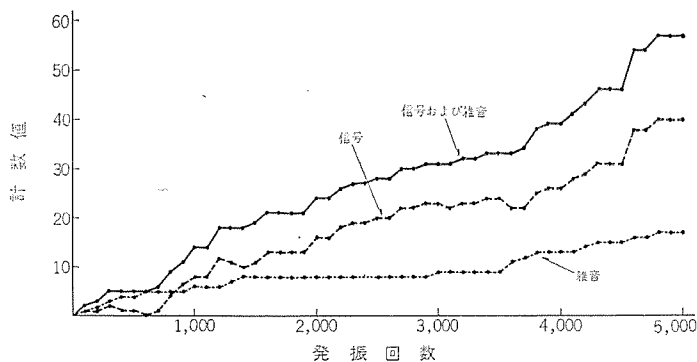


図 2.8 排煙中の SO₂ による ラマン 散乱光強度
Detected Raman scattering signal from SO₂ in the stack plume
of a power plant.

当するゲート開放区間である。具体的な数値は表 2.2 に示してある。

図 2.7 は煙突の出口付近（距離 239 m）で煙を透過した場合と、煙から風上側に レーザビームを移動した場合について、距離 359 m からの ラマン 散乱光の強さを比較したものである。両者の差より煙の透過率を求めることができる。透過率の減少が、散乱によるものとすれば、ミイ 散乱に対する微分散乱断面積を求めることが可能で、その値は、

$$\beta = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{T}\right) = 0.15 \text{ m}^{-1} \dots \dots \dots (2.16)$$

である。この値は前節の検討に引用したように レーザレーダの性能を検討するうえでの基本量の一つである。

(2) SO₂ ラマン 散乱光の測定

観測の対象として硫黄分 1.6% の重油を燃焼しているボイラのもので、高さ 150 m の煙突から排出されている煙を選んだ。この重油をもし空気比 1.1 で燃焼した場合、排煙中の SO₂ 濃度は 1,000 ppm となる。

測定装置を煙から距離 228 m の位置に固定して実験をおこなった。図 2.8 に実験結果を示す。横軸はレーザの発射回数であり、縦軸は受信光電子数である。図中、“信号+雑音”とは信号カウンタの計数値であり、“雑音”とは雑音カウンタの計数値である。“信号”とは両者の差で、前にのべたように ラマン 散乱光の計数値ということになる。

式 (2.15) に各定数、たとえば表 2.2 に示した光学効率や表 2.1 に示した ラマン 散乱の断面積などを代入することにより、SO₂ 濃度

$\bar{N}(R)$ を求めることができる。計算の結果は 3,080 ppm となった。この値は、先にのべた燃料中の硫黄分から計算される SO₂ 濃度に比較して約 3 倍高濃度である。この差の原因としては、フィルタの透過率など式 (2.15) に代入すべき装置定数の測定誤差、SO₂ の ラマン 散乱断面積の測定誤差、使用した重油中の硫黄濃度の測定誤差などが考えられる。いずれの原因もありそうなことであって、測定値と理論値の差を説明するきめ手を欠いている。しかし、非常に最近の文献によれば⁽³⁾、表 2.1 に引用した SO₂ の ラマン 散乱断面積が同じ著者により最近 $2.1 \times 10^{-34} \text{ m}^2/\text{str}$ と書き改められており、その値を使用すれば、SO₂ 濃度は $3,080 \times (1/1.7) = 1,800 \text{ ppm}$ となり、燃料中の硫黄濃度より推定される排出濃度 (1,000 ppm) に近くなる。今後さらに実験を重きねて、ラマン 散乱による レーザレーダ実用化のための基礎をかためたいと考えている。

3. む す び

前回報告した公害監視用レーザレーダを用いて、測定した排煙流の観測と SO₂ 濃度の測定結果を中心にまとめたものである。ミイ 散乱については、観測結果をもとにして大気散乱がおもな要因である測定可能な限界距離を求めた。ラマン 散乱については、世界ではじめて、実際の煙突より排出される煙の中の SO₂ 濃度を測定することに成功した。このように、このレーザレーダは、装置一台でもって SO₂ 排出濃度と煙突の有効高さを測れる特長的なもので、煙のなかの SO₂ が排出基準に適合するか否かの判定を下せるものであり、監視装置として高い価値をもつことが実証された。現に、装置の納入先である(株)公害気象研究所では昨年度 1 年間にわたって、陸奥小川原・鹿島・水島・防府・志布志などで観測業務をおこなってきており、装置の信頼性についても高く評価され、公害防止に貢献する測定器として重要な役割を占めるに至った。

終わりに、レーザレーダ排煙観測車の製作にあたり、ご指導いただいた 東北大学 電気通信 研究所 稲場文男教授・小林喬郎助手、(株)公害気象研究所 金清勝広社長、ならびに製作に協力された関係各位に深謝いたします。(昭和 47-7-31 受付)

参 考 文 献

- (1) 中原，ほか：三菱電機技報，46，561 (昭 47)
- (2) D. G. Fouche and P. K. Chang：APL，18，579 (1971)
- (3) P. K. Chang (to be published)

けい素鋼板の磁気ひずみの変圧器騒音への影響

土屋 英司*・岡田 將*
河上 英典**

Influence of Silicon Steel Sheets having Magnetostriction on Power Transformer Noise

Manufacturing Development Laboratory Hideshi TSUCHIYA・Masaru OKADA
Itami Works Hidenori KAWAKAMI

According to the enactment of regulations for noise and with the increase of people's attention to the public hazard, a demand becomes pressing for reducing the noise level of power transformers. As a means to realize low noise machines, laborious research has been kept on finding the relation between the transformer noise and magnetostriction of the materials. This article describes the experimental results of model transformers having core materials of altered magnetic characteristics or with bending stress and air gap in the core, and further of large power transformers built of materials of modified magnetostriction. Thus it states the magnetostriction has bearing with the noise of the apparatus.

1. ま え が き

近年、産業と経済の高度な発展に伴って、大都市およびその周辺の衛星都市への人口の集中化がめざましく、それにつれて都市の電力需要も一段と活発になり、変電所の送・配電用変圧器の設置台数およびその容量が増大し、かつ変電所周辺へ家屋が密集するようになった結果、変圧器の発する騒音が市民の耳目を集めるようになった。

電機業界としてもこの問題に積極的に取り組み、電気技術基準調査委員会内に騒音規制特別委員会が設立され、発変電所等の騒音測定法ならびに騒音の低減・防止対策について調査研究を進め、電気技術指針 JEAG 5001-1971「発変電所等における騒音防止対策指針」が作成された。こうした社会の要請に応じて、当社でも従来から変圧器の低騒音化をはかるための種々の開発研究を行っており、数多くの低騒音変圧器を開発電力会社などへ納入した実績を持っている。

変圧器の発する騒音は古くから問題にされており、欧米では1930年代前から多くの研究結果が発表されている。ちなみに1968年に出された IEEE Committee Report⁽¹⁾ には、1930年から1966年の間に500余の論文と特許類が集録されている。そしてその後もとだえることなく、この種の報告が続いている。このように約40年間にわたっても、なお解決ができないのは、変圧器騒音の内蔵する問題が広範かつ複雑であり、騒音発生因の解明や騒音防止方法の確立には、広い技術分野の協力と経済的支援が必要で、一朝一夕には解決できない困難な事情によるものと考えられる。

変圧器の騒音は変圧器本体から発生するものと、付属の冷却器から発生するものがあり、従来から低騒音化対策としては、変圧器本体および冷却器そのものの発する騒音レベルを低減しようとする振動源対策と、騒音発生源の音圧レベルはそのままにして、変圧器外部へ出る騒音レベルをしゃ音壁などで反射や吸音させる防音対策の2種類の方策がとられている。騒音レベルを大幅に低減させるためには、後者の方法が比較的容易で、もっぱら低騒音変圧器といわれているものはこの種のものであり、前者の方法で大幅な騒音レ

ベルの低減をはかることは、現時点では技術的に困難である。これは前記したごとく、変圧器騒音が問題とされはじめた当初から今日に至るまで、騒音発生源の解明自体が困難であるという事情によるばかりでなく、たとえ発生源が明確になっても、振動源である変圧器鉄心の特性を所要のものに早急に改善することが、困難であるためと考えられる。

変圧器本体の発生する騒音の振動源として巻線と鉄心が考えられ、この両者が下記の起振力に基づいて振動することにより、変圧器騒音が発生するものと考えられている。

- (1) 巻線導体間またはコイル間に働く電磁力
- (2) 鉄心材料の磁気ひずみに基づく応力
- (3) 鉄心の継目部や積層板間に作用する磁気吸引力

これらの起振要因のうち、変圧器の発する音圧レベルに対する電磁力の寄与は非常に小さく、ほとんどが鉄心の振動に基づくものと考えてよい。それでは起振力の主因となる鉄心の磁気ひずみと磁気吸引力のうち、どちらの寄与が大きいかという点については、現在のところ明確な説明がなされていないようである。これは交番磁化した際に、磁気ひずみによる振動の周波数と、磁気吸引力による振動の周波数が同じであるために、騒音におよぼすこれらの効果を分離しがたいことによるものと考えられる。諸文献の説明も騒音の原因が磁気ひずみによるというものと、磁気吸引力によるというものと、磁気ひずみと磁気吸引力の両者によるというものとに分れており、はっきりした説明がなされていないようである。しかし、鉄心は適当な締付圧力で Clamp して製作されるので、磁気吸引力の効果はほとんど考えなくてよく、変圧器鉄心の振動は、磁気ひずみに基づくものであるという考えが普通行なわれている。

電気学会磁性材料専門委員会でも、こうした背景からこの問題をとり上げ、筆者らも参加して模型変圧器を製作して、磁気ひずみ量と変圧器騒音の関係を調べる実験を行なった。その結果が電気学会技術報告⁽²⁾にまとめられている。

筆者らはこれらの問題に関して、独自に模型変圧器および実機である電力用変圧器を用いて、振動源対策という観点から、変圧器鉄心の素材特性と変圧器騒音についての基礎的な実験検討を行なった

ので、その結果について報告する。なお防音対策に関しては、三菱電機技報⁽³⁾に詳説されているのでそれらを参照されたい。

2. 模型変圧器の製作

起振源である磁気ひずみと磁気吸引力は、使用される鉄心の材料特性とか変圧器鉄心の磁路構成に大きく依存する。素材特性である磁気ひずみ、磁気吸引力を支配する要因の一つである透磁率は、ともに structure sensitive および stress sensitive であり、これらは、材料によりかなり異なることが知られている。鉄心の磁気特性を問題にする際には、もっぱらその平均的特性がとり上げられるが、音との関係を論じる際には、その均一性が問題となるという文献⁽⁴⁾もある。

25 cm エプスタイン 試験器あるいは 定尺試験器による、エプスタイン 試験料または定尺試料の磁気特性が、そのまま変圧器鉄心に生かされるわけではない。実際の電力用変圧器の鉄心の磁路構成に見られるように、内側の磁路長と外側の磁路長の比は、問題とならないほど小さいものではないので、磁路の外側と内側での磁束密度の疎密の発生、また鉄心素材として、現在ではもっぱら方向性けい素鋼帯が使われるので、鉄心磁路のコーナ部での磁束の曲りの効果などにより、変圧器鉄心特性は一般に素材特性値からかなりはずれる。

今回の模型変圧器による比較実験では、鉄心構造は同一にして、使用した鉄心素材の特性を変化させる方法によったが、素材特性値に変化をもたせた基準はあくまでも定尺測定値、すなわち、方向性けい素鋼帯の順方向特性であり、磁束の曲り等の効果は、各模型変圧器で同等であると仮定し（厳密に言えば、素材特性の相違により、磁束の曲り等の効果も異なるはずである）、今回の検討に際しては要因として考慮に入れなかった。そしてこのような磁束の曲りとか、鉄心磁路の内側への磁束の集中といった効果は、通常単相 2 脚鉄心より三相 3 脚鉄心のほうが顕著であるので、今回、こうした影響を少なくすることを考慮に入れて、2 脚鉄心構造により実験を行なった。

変圧器鉄心の素材要因および工作要因と、変圧器騒音の関係を調べるために、前記要因を取り入れた 2 系列の模型変圧器を製作した。実際の電力用変圧器鉄心には、これら両要因が加味されているので、模型変圧器による実験のほかに、実機である電力用変圧器を使用した実験も併せて実施した。これらの実験内容を以下に示す。

(1) 磁気ひずみ特性、磁気特性および形状などが異なる 7 種類のけい素鋼帯を用いて、模型変圧器を製作し、各素材諸特性と騒音レベルとの相関を調べる。

(2) 大形変圧器鉄心では、けい素鋼帯の板厚の偏差などにより発生する工作上避けられない鉄心の波打ちや、鉄心継ぎ目部の空げきの効果を調べるため、模型変圧器鉄心にこうした波打ちや空げきを故意に実現して、これらの影響を調べる。

(3) ルーチンに購入している、磁気ひずみ特性、磁気特性および形状などが異なる 3 種類の鋼帯を実機である電力用変圧器に用いて、素材特性と変圧器騒音レベルの関係を調べる。

今回の模型変圧器による実験では、素材特性と騒音の相関を求めることを主目的としているので、使用したけい素鋼帯を鉄心加工する際に、塑性ひずみ加わらないように留意した。鋼帯幅を 100 mm 以上とすれば、磁気ひずみ特性をはじめとする磁気諸特性にせん(剪)断応力の影響がほぼおよばないことが知られているので、鋼帯幅は 150 mm とした。

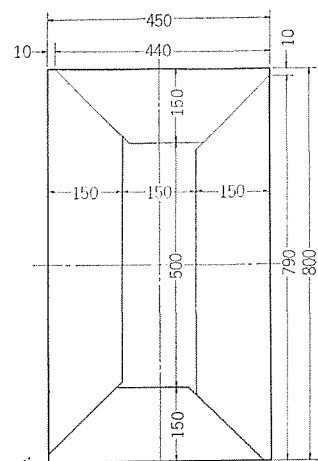


図 2.1 模型変圧器鉄心の接合方式
Jointing style of model transformer core.

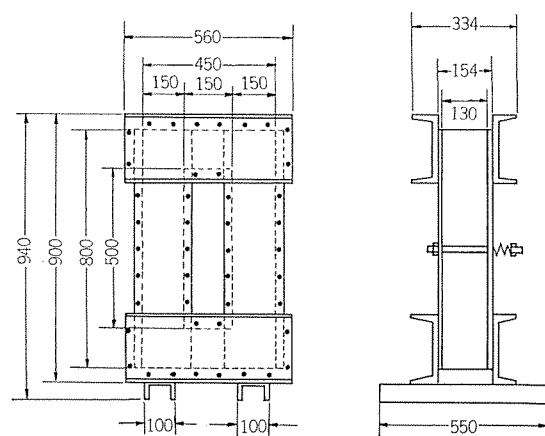


図 2.2 模型変圧器の締付構造
Clamping construction of model transformer.

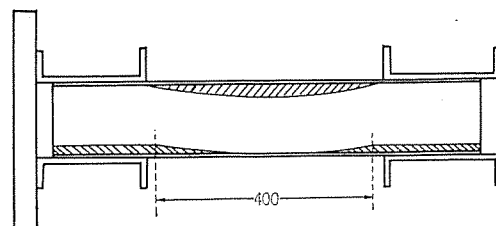


図 2.3 弾性曲げを印加した模型変圧器の構造
Example of model transformer applied with elastic bending.

また締付圧力の不均一は鉄心特性を悪化させる要因の一つとなり、かつ局部的な固有振動数をもつ原因の一つともなるので、締付圧力はできるだけ均一となるように締付金具を強固にし、締付ボルトの数をできるだけ多くした。

模型鉄心の積層方式は鉄心特性をそこなわず、製作の簡便さを考慮して 2 枚積みとし、接合方式は、方向性けい素鋼帯の圧延方向特性をできるだけ生かすために 45° 接合とし、鉄心 4 すみの接合部は、一般に採用されている オーバラップ 方式にして、バット特性にみられる鉄心特性の劣化や、磁気吸引力による振動の発生を避けた。採用した接合方式を図 2.1 に示した。

実験(1)のために製作した模型変圧器の締付圧力の大きさは、複数枚のさらバネを積層して、そのたわみの大きさから検出した。締付構造の一例を図 2.2 に示した。なお、7 種類の模型変圧器の鉄心重量は、鉄心特性を基準化するためすべて 300 kg に統一した。

つぎに、実験(2)のために製作した模型変圧器の鉄心構造は、鉄

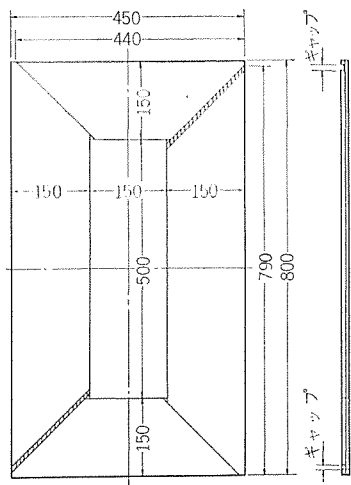


図 2.4 空けきを設けた模型鉄心の接合方式
Magnetic core joint style of model transformer with air gaps.

心積み高さのほかは前者と同じである。実験はまず、弾性曲げ（波打ち）の加わっていない状態で、模型鉄心を製作して実験を行ない、その後鉄心を解体し、図 2.3 に示したような弾性曲げを加えた鉄心を製作して、同様な実験を繰り返した。印加した弾性曲げ半径の大きさは、2,000 mm と 4,000 mm である。

空けきの効果を調べる実験では、最初、鉄心接合部にできるだけ空けきが生じないように注意して、鉄心を製作して実験を行ない、つぎに鉄心を解体し、2枚積みの積層板のうち、各1枚の45°切断部から順次2mmおよび4mmをせん断により落とし、図 2.4 に示したようにコーナ部の接合部に一層おきに空けきを設けた鉄心を製作して、同様な実験を行なった。

なお、実験(2)で製作した模型鉄心の締付圧力の検出は、ボルトに張り付けたストレインゲージによる方法を採用した。これらの模型鉄心の鉄心重量は、約 220 kg で積高さは約 100 mm である。

3. 実験方法

方向性けい素鋼帯の磁気測定は、通常 25 cm エプスタイン試験器によ

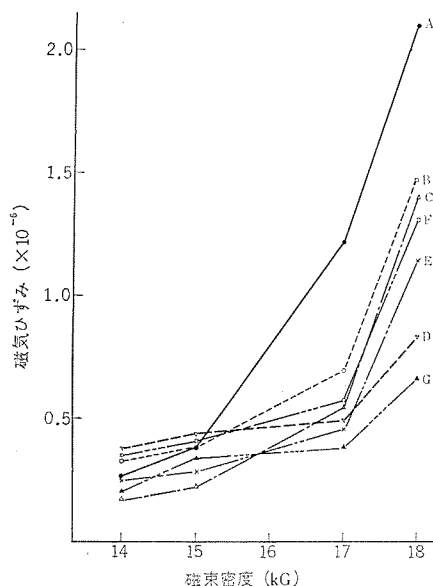


図 4.1 素材の磁気ひずみ
Relation between magnetostriction and flux density of each material.

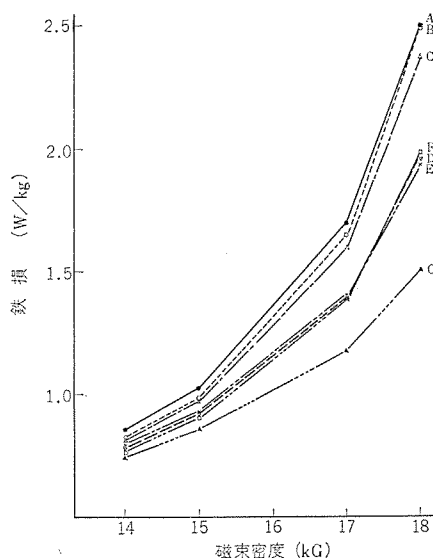


図 4.2 素材の鉄損
Relation between iron loss and magnetostriction of each material

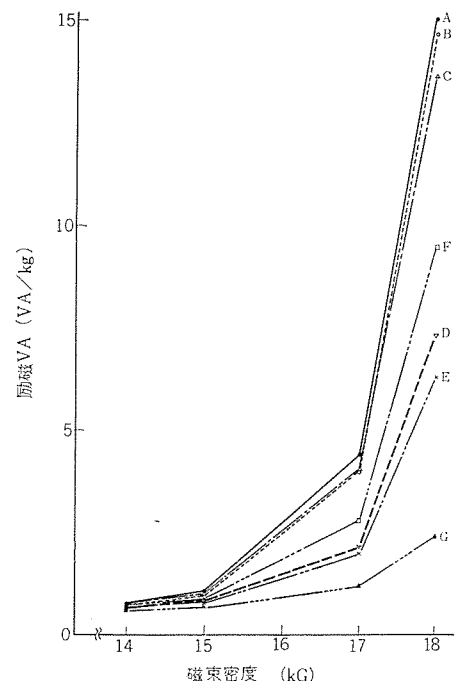


図 4.3 素材の励磁 VA
Relation between exciting volt-ampere and flux density of each material.

り行なわれる。しかし、周知のように方向性けい素鋼帯はひずみに敏感なゆえに、25 cm エプスタイン 試片に切断後、必ずひずみとり焼なましをするように規定されている。今回の実験では、As Received の状態の鋼帯をそのまま模型鉄心に使用したので、素材特性は模型鉄心に使用したのと同じ幅 150 mm で、長さだけ 1,100 mm とした試験片により測定した。試験片の鉄損と励磁 VA は、あらかじめ 25 cm エプスタイン 試験器との比較試験により、実効重量係数を求めている。扁平磁化コイルを用いた定尺磁気試験器によって測定した。定尺磁気試験器の詳細については、すでに電気学会技術報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾に述べられている。

定尺磁気試験の場合と同じ試験片を用いて、磁気ひずみの測定を行なった。定尺磁気ひずみ試験器は、普通の定尺磁気試験器と同じく、扁平コイル内に試験片をそう入して、試験片の一部を固定し他端に微小変位検出器を接続して、交流商用周波数で励磁したときの試験片の周期的な長さの変化を測定するようにしたものである。微小変位検出器としては、圧電効果を利用したセラミックトランスデューサを用いた。試験片の磁気ひずみ値は、ブラウン管オシロ上に描かせた磁気ひずみ信号と、磁束密度信号の作るリサーチ図形から測定した。

模型鉄心の騒音レベルの測定は、暗騒音の影響を避けて測定精度を上げるために無響室で実施した。なお、磁気ひずみおよびその他の磁気試験は、商用周波数 50 Hz で行なったが、模型鉄心および電力用変圧器の試験は、電源の都合で商用周波数 60 Hz で実施した。

4. 実験結果

(1) 素材の磁気諸特性を変えたとき

模型変圧器鉄心の製作に用いた 7 種類の鋼帯には、便宜上 A, B, C, D, E, F および G という名称を付けた。磁気ひずみ・鉄損・励磁 VA などの磁気特性は、磁束密度 14, 15, 17 および 18 kG で測定した。図 4.1~4.3 に素材の種類をパラメータにとって、各磁束密度における鉄損、励磁 VA、および磁気ひずみ (Peak-Peak 値、以下 P-P 値と略す) の測定結果を示した。

表 4.1 素材の板厚と占積率
Gauge and space factor of each material.

素材の種類	特性	板厚 mm	占積率 %
A		0.338	97.6
B		0.342	98.0
C		0.344	98.1
D		0.343	98.1
E		0.346	98.3
F		0.340	98.1
G		0.337	97.4

各素材の板厚と占積率の測定値を表 4.1 に示した。板厚は、磁気試験に用いた試験片を利用して質量測定法により、一方、占積率

は、JIS に規定されている方法により求めた。

模型鉄心の騒音、鉄損および励磁 VA は、素材特性の測定を行なったのと同じ磁束密度で測定した。模型鉄心の締付圧力は 2 kg/cm^2 と 5 kg/cm^2 である。素材特性と同様、素材の種類をパラメータに取って、磁束密度に対する音圧レベル (dB(C))、鉄損 (W/kg) および励磁 VA (VA/kg) の締付圧力 2 kg/cm^2 における測定結果を、図 4.4 ~ 4.6 に示した。

図 4.7 は横軸に素材の磁気ひずみの P-P 値を、縦軸に模型鉄心の締付圧力 2 kg/cm^2 における音圧レベル (dB(C)) を取ってプロットしたものである。音圧レベルは、磁気ひずみの対数値に比例するといわれるが、実際的には真数で表わしたほうが便利の場合が多い。同図の曲線は、音圧レベルに対する磁気ひずみの回帰曲線を最小自

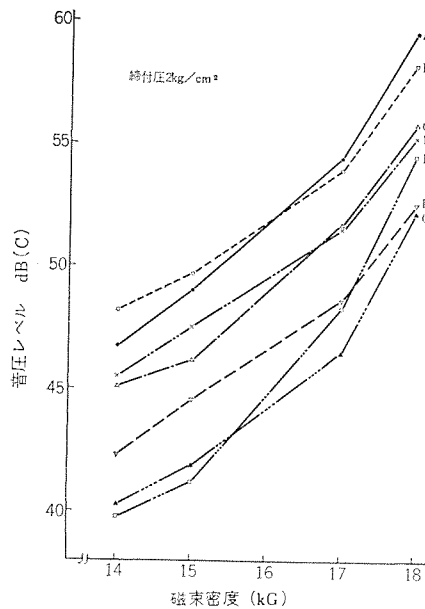


図 4.4 各模型変圧器の音圧レベル
Relation between sound pressure level and flux density in each model transformer.

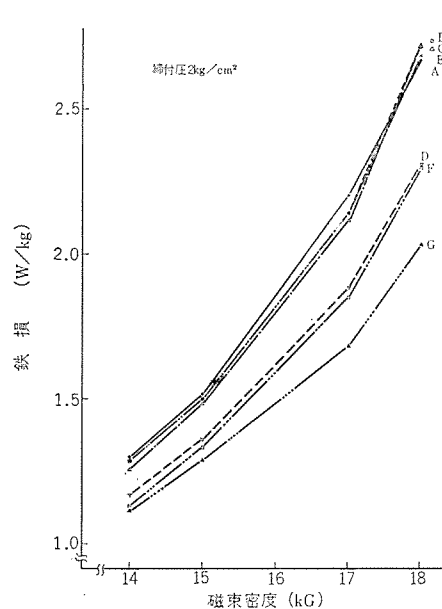


図 4.5 各模型変圧器の鉄損
Relation between iron loss and flux density in each model transformer.

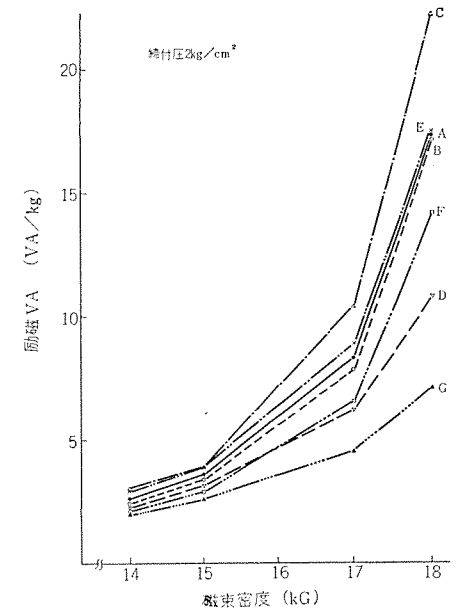


図 4.6 各模型変圧器の励磁 VA
Relation between exciting volt-ampere and flux density in each model transformer.

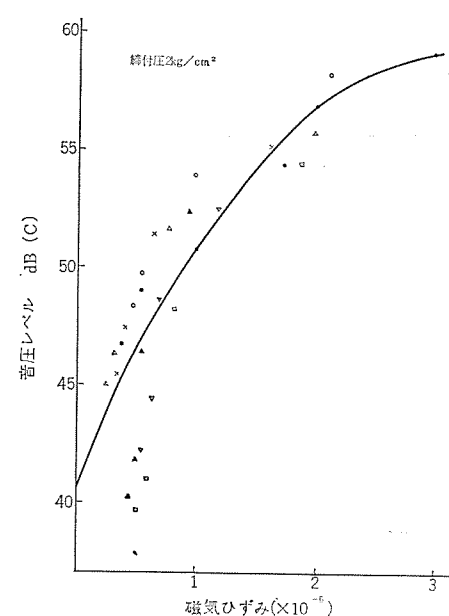


図 4.7 磁気ひずみ (P-P 値) と音圧レベルの関係
Relation between magnetostriction (Peak to peak value) and sound pressure level.

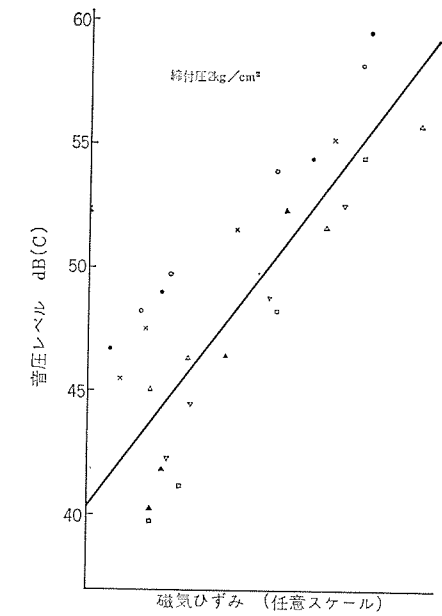


図 4.8 磁気ひずみ (LF 値) と音圧レベルの関係
Relation between magnetostriction (LF value) and sound pressure level.

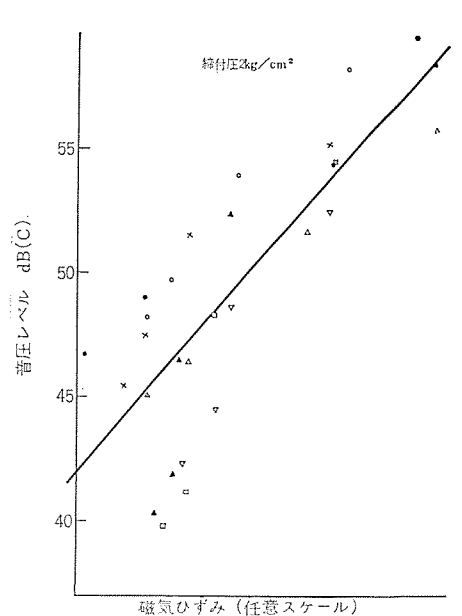


図 4.9 磁気ひずみ (L^2F 値) と音圧レベルの関係
Relation between magnetostriction (L^2F value) and sound pressure level.

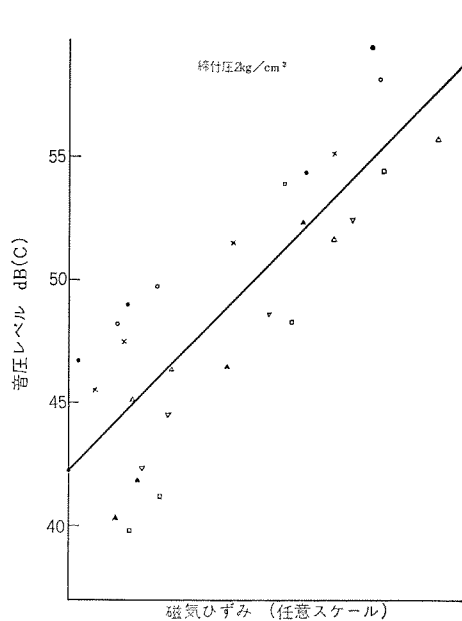


図 4.10 磁気ひずみ (LF^2 値) と音圧レベルの関係
Relation between magnetostriction (LF^2 value) and sound pressure level.

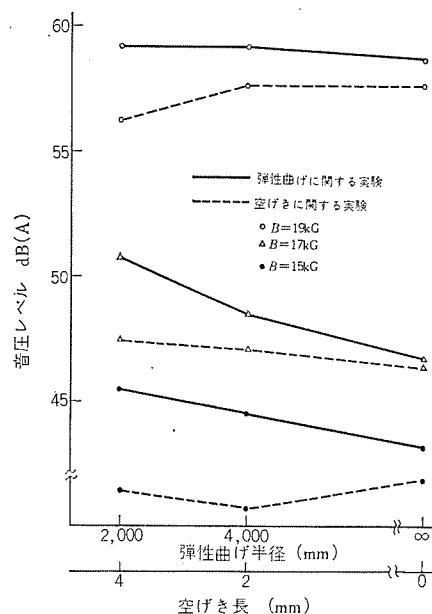


図 4.11 弾性曲げ半径および空げき長と音圧レベルの関係
Relation between radius of elastic bending or length of air gap and sound pressure level at each flux density.

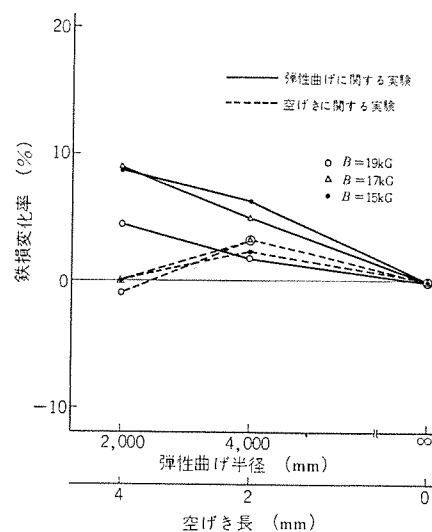


図 4.12 弾性曲げおよび空げきによる鉄損変化率
Rate of change of iron loss owing to elastic bending and air gap.

乗法により二次曲線で近似して示したものである。

磁気ひずみ測定の際、磁気ひずみ信号の調波分析も同時に行なった。その測定結果から、調波成分とその周波数の3種類の積

$$LF = \log_{10} \sum \lambda_i f_i$$

$$L^2F = \log_{10} \sum \lambda_i^2 f_i$$

$$LF^2 = \log_{10} \sum \lambda_i f_i^2$$

を求めた。任意スケールで表わしたこれらの諸量と、縛付圧力 2 kg/cm² における音圧レベル (dB(C)) の関係を、プロットしたものを図 4.8 ~ 4.10 に示した。図中の各直線は、音圧レベルに対する各磁気ひずみ量の回帰直線を示す。各量と音圧レベルの相関係数は、それぞれ 0.829, 0.829 および 0.826 である。

各磁束密度における模型変圧器の素材磁気ひずみ (P-P 値) の対数値と音圧レベルの間には、磁束密度の低いところでは相関がなく、磁束密度が高くなると相関がみられた。こうした結果が得られた理由として、低磁束密度では磁気ひずみ値が小さく、かつ音圧レベルも小さいので観測誤差の影響が考えられる。また方向性けい素鋼の磁気特性は、むしろ低磁束密度でのほうが外部応力や磁路構成によって変化しやすいので、この効果の寄与も考えられる。

各磁気ひずみ量と音圧レベルの相関は、磁気ひずみの P-P 値の相関が磁気ひずみの LF , L^2F および LF^2 各値のそれらより大きかった。この原因として、磁気ひずみの高次の調波成分は振幅が非常に小さいので、測定誤差が大きいことと、音圧レベルに対して調波成分が同一レベルで寄与すると考えたが、実際は鉄心の振動特性により、各調波成分の寄与の割合が変化することが考えられるが、今回の実験結果では詳細は不明である。

磁気ひずみ以外の鉄損および励磁 VA と、騒音レベルの相関係数を求めたところ、鉄心特性のほうが素材特性より相関係数が大きかった。これは素材特性が、鉄心に組上った状態で変化していることを示しているように思われる。

(2) 弾性曲げや空げきを与えたとき

図 4.11 に磁束密度をパラメータにとって、弾性曲げ半径と音圧レ

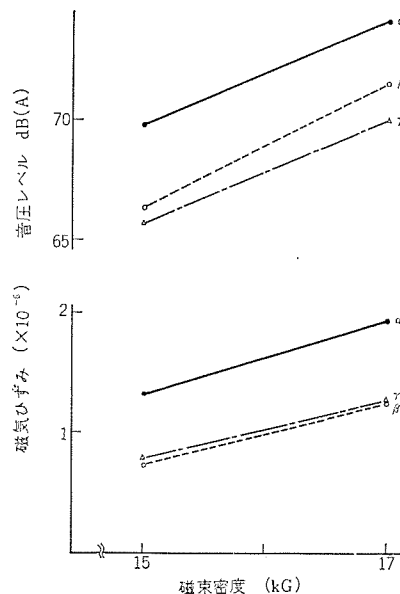


図 4.13 電力用変圧器の音圧レベルと磁気ひずみ
Sound pressure level and magnetostriction of power transformers.

ベル (dB(A)) に関する測定結果を示した。音圧レベルは、弾性曲げ半径に対して単調に増加する。増加の傾向は、磁束密度の低い $B=15, 17$ kG のほうが $B=19$ kG より大きい。磁気特性の劣化の割合は、上記の測定範囲では磁束密度が低いほど大きい、実験結果はこの傾向と一致している。

同図に前記と同様、磁束密度をパラメータに取って、空げき長と音圧レベル (dB(A)) の関係を測定した結果を併記した。空げきと音圧レベル間に一定の傾向が見られなかった。

図 4.12 に模型鉄心の弾性曲げ半径および空げきに対する鉄損の変化率を、磁束密度をパラメータに取って示した。鉄損変化率は、弾性曲げ半径に対して単調に増加している。空げきについては一定の傾向が見られなかった。

(3) 磁気ひずみのレベルを変えた実験

以上に述べた模型鉄心についての実験では、素材要因と工作要因を取り上げた。実験である電力用変圧器には、こうした両要因が含まれていると考えられるので、実際の三相内鉄形電力用変圧器に以上の実験結果を適用して、模型変圧器による結論の一部をチェックすることを考えた。実験は磁気ひずみをはじめとする磁気諸特性の異なる3種類の鋼帯を、構造が同じ3台の変圧器に使い分けて、騒音レベルを測定するという方法で行なった。

図4.13にこれらの測定結果を示した。鋼帯および変圧器には便宜上 α 、 β 、 γ という記号を付けて示した。図中の下方の直線は、3種類の鋼帯の磁束密度15 kGと17 kGにおける磁気ひずみの測定結果であり、図中上方の直線は、それらの鋼帯を用いて製作した三相電力用変圧器の、同磁束密度における騒音レベル(dB(A))の測定結果を示している。

β と γ の騒音レベルと磁気ひずみの大きさの順序が逆になっているが、磁気ひずみの大きさのレベルの差が大きくなると、磁気ひずみの大きさと騒音レベルの大きさがほぼ対応することがわかった。 β と γ の騒音レベルの傾向が逆になったのは、素材けい素鋼の磁気特性の応力特性や形状が異なっていたためと推定される。

5. 検 討

変圧器の発する騒音のうち、変圧器鉄心の振動に基づくものだけをとり上げて考える。変圧器鉄心の起振源は、鉄心を構成するけい素鋼帯の長さが、磁化の変化に伴って変化する磁気ひずみ振動と、積層鉄心の各積層板間および鉄心の脚部とヨーク部の継ぎ目部に働く磁気吸引力であるといわれている。したがって、変圧器の低騒音化を企てるためには、この磁気ひずみと磁気吸引力を小さくすることを考えればよい。

しかし、変圧器鉄心は、鉄心全体を一つの剛体として考えたときの固有振動数のほかに、局所的に異なる局部的固有振動数を持つものと考えられている。変圧器鉄心として最もpopularに利用される積層鉄心は、0.30 mm~0.35 mmという薄いけい素鋼を積層したのちに、適当な締付圧力で締付けて製作されるので、完全な剛体として考えることができないし、振動の起振源が鉄心外ではなく鉄心内に分布しているので、その振動モードは非常に複雑になっていると考えられる。

また鉄心内に生じる磁気ひずみおよび磁気吸引力に基づく振動は、鉄心全体にわたって一様ではない。変圧器鉄心内には、鉄心構造および材料特性上避けられない不均一性が必ず存在する。まず第一に鉄心構造からくる不均一の問題であるが、2章に示したように、実際の磁路長は鉄心の内側と外側で異なっているため、磁束密度の疎密が生じているので、この影響を考慮に入れることが必要である。方向性けい素鋼帯を用いて製作される積層鉄心構造を取る変圧器鉄心では、磁路のコーナ部における磁束の曲りの効果は軽視できない重要な問題である。磁束の通る方向が、圧延方向からはずれると磁気特性は著しく劣化する。実際の電力用変圧器鉄心では、磁束の曲りの効果を受ける脚部とヨーク部の接続部分の占める割合は、かなり大きいものである。

次に、磁気ひずみを含めたけい素鋼の磁気特性の均一性の問題であるが、通常変圧器鉄心素材の磁気特性は、複数枚のエプスタイン試料および定尺試料の測定値の平均値で代表するが、一般にけい素鋼の磁気ひずみ値は、各エプスタイン試料間においてさえ、相当ばらつ

いており、透磁率についても、磁気ひずみほどでないにしてもばらつきがある。したがって、磁気ひずみおよび磁気吸引力による振動の大きさは、局所的にみれば異なっていると考えられる。鉄心を構成する各積層板間のある部分の振動の最大値と、その部分の局部的固有振動数が一致すれば、局所的な振動が増幅され、騒音レベルの増大を招くかもしれない。

鉄心に応力が加わっていないと考えても、前記したような多数の問題点がある。ところが実際の変圧器鉄心には、必ず応力が加わっており、方向性けい素鋼をstress freeで使用しているわけではない。前記したように積層変圧器鉄心は、機械的強度を持たせるために、通常、数 kg/cm²の締付圧力でClampされている。また積層鉄心は、0.30~0.35 mmという薄板を幾層にも積層して製作し、かつ材料面から完全に平たんなものを望むわけにはゆかないので、積層作業の巧拙もあっていくらか波打ち、したがって、締付圧力のほかに鉄心に弾性曲げ応力が加わる。こうした事情から方向性けい素鋼に関しては、stress freeの状態だけでなく、応力印加状態での磁気特性というものを考慮に入れる必要がある。

低騒音変圧器鉄心用素材としてのけい素鋼の具備すべき条件として、特性のばらつきが小さく、stress freeの特性がすぐれているだけでなく、応力印加により特性が劣化しないことも必要である。応力下での劣化の程度をminimizeするためには、macro的、micro的にみた平たん度すなわち形状のよい材料が望まれる。

変圧器騒音という観点から素材諸特性の効果を考察した。現在われわれが鉄鋼メーカーからルーチンに購入しているけい素鋼を、こうした観点から検討し、われわれの望んでいる特性値を満足しているかどうかを、実験的によく調べてみる必要があるように思われる。前記の考察は、あくまでも定性的であり、はたしてどの要因が最も重要であるのかという点は、直接実験の確認によらなければならない。今回の一連の実験は、こうした考えかたから行なった。

模型変圧器および実験である電力用変圧器による実験結果から、磁気ひずみと変圧器騒音の間に相関がみられた。磁気ひずみの大きさのレベルが相当に異なれば、騒音レベルに明確な差として現われた。しかし、各素材間の磁気ひずみの大きさの差がさほど大きくない場合には、はっきりしなかった。これは鉄損とか透磁率などの測定精度に比べて、磁気ひずみおよび騒音レベルの測定精度が悪いために、これらの差が測定誤差内に隠れてしまったという危ぐ(惧)もあるが、実験結果のところで述べたように、素材の諸特性がストレートに鉄心特性にならず、その変化の割合が、各素材で異なっていたという事実に寄因しているように思われる。こうした傾向は模型変圧器だけでなく、実験である電力用変圧器に関する実験結果にもみられた。

変圧器の発する騒音に対して、磁気ひずみと磁気吸引力を一次的要因と考えれば、これらと磁氣的に密接な関係にある鉄損および励磁VA特性を、二次的要因と考えることができる。そしてこれら両要因の間には、一般に強い相関関係がある。そこで模型鉄心に組上った状態での、磁気ひずみ特性を実際に測定することは困難なので、素材と鉄心両状態で測定が可能な鉄損および励磁VA測定値から、模型鉄心と実験に供した電力用変圧器の磁気ひずみ特性値の推察を行ない、以下のような解釈をした。

今回の模型鉄心の実験結果では、特に磁束密度の低いところで、磁気ひずみと変圧器の音圧レベルとの間に相関がみられなかった。この領域での特性の変化が大きかったことが、この理由として考えられる。模型鉄心の磁路構成はすべて同一であるが、鉄心素材とし

て特性のことなる方向性けい素鋼を使用しているのです、その変化の仕方は個々の素材で異なり、かつ外部応力に対する変化の割合は、低磁束密度ほど大きいので、こうした特性の変化は、磁路構成とか素材の応力特性とか形状の差に基づくものと思われる。

6. む す び

以上、模型変圧器を製作し、かつ実機である電力用変圧器に適用して、鉄心素材諸特性と変圧器の音圧レベルの関係を、調査検討した結果を報告し、以下に示す結果が得られた。

- (1) 素材の磁気ひずみの差が大きい場合に、模型鉄心および電力用変圧器の音圧レベルの間に相関がみられた。
- (2) 弾性曲げ応力のような外部応力が鉄心に加わると、鉄心特性が劣化し、音圧レベルも増大した。
- (3) 磁気ひずみの差が小さい場合と磁束密度の低いところでは、

素材の磁気ひずみ値と音圧レベルの間に相関がみられなかった。

最後に本実験を実施するに際して、種々ご協力およびご指導いただいた当社生産技術研究所と伊丹製作所の関係者のかたがたに感謝します。

参 考 文 献

- (1) IEEE Trans., PAS-87-2, P 372 (1958)
- (2) 電気学会技術報告, (I)部, 第101号
- (3) 神谷, 山内, ほか: 三菱電機技報, 46, No. 3 (昭47)
- (4) Elec. Times, 11, P 675 (1960)
- (5) 電気学会技術報告, 第8号 (昭30)
- (6) 電気学会技術報告, 第17号 (昭32)
- (7) 土屋, 岡田: 電気学会全国大会, 621
- (8) 土屋, 岡田: 三菱電機技報, 43, No. 7 (昭44)

発電機端部の固定子巻線に働く電磁力

野村 達 衛*

Magnetic Forces Working on End Windings of Generators

Central Research Laboratory Tatsuei NOMURA

By the introduction of powerful cooling of late, a marked trend is observed that loading of generators enlarges, leakage flux at the ends of the machine increases and stray load loss owing to eddy currents at the stator core ends and magnetic force working on the stator end windings become large.

This article shows a new calculation of magnetic forces working on stator windings and analysis of the distribution of magnetic forces at the moment of sudden three phase short circuit. This analysis has clarified the effect of magnetic structure at the stator end which was considered impossible to take into account in the past. It has been found that calculated values conform to actual measurement by checking them with search coils arranged in the layers of windings. It has been also confirmed that calculation based on the assumption of all rotor currents flowing in the rotor windings is good enough for the purpose by referring it to actual measurement.

1. ま え が き

近年冷却の強化によって電気装荷が増加され、発電機の端部における漏れ磁束が増加し、固定子巻線端部に働く電磁力や、固定子鉄心端部におけるうず電流による漂遊負荷損失が、増加する傾向にある。

固定子巻線に働く電磁力は特に突発短絡時が問題で、大容量化とともに安全性のうえで重要である。突発短絡時の電磁力を巻線層に垂直な圧力で比べると、大容量化によって必ずしも増加しない。しかしながらタービン発電機では、大容量化によって端部巻線は長くなり支持強度について検討を要する。

今までに発表された端部巻線に働く電磁力の計算方法としては、Biot-Savart の法則にもとづく数値計算⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾がよく使われてきたが、この方法では磁性構造物の影響は無視される。また Tegopoulos 氏は、回転子軸と円筒形ケーシングの影響を考慮できる解析解による計算法を発表しているが⁽⁴⁾⁽⁵⁾、この方法においても、固定子鉄心端部のエンドシールド^(注)等の影響は考慮できない。筆者はこれらの鉄体構造物の影響を、かなり詳しく考慮できる端部磁界の計算方法を発表している⁽⁶⁾。本文の方法はこの端部磁界計算法を使用し、端部構造物の影響が考慮される。

固定子巻線に働く電磁力は、三相突発短絡時においておにも問題となる。また大容量のタービン発電機では巻線端部が長くなり、電気装荷も増大しているため、定常運転時の電磁力にもとづく振動も問題になる。しかしながら、この後者については突発短絡時の解析に比べて容易に解析でき、ここでは三相突発短絡時についてのみ論ずる。

三相突発短絡時の電流は、固定子電流の直流成分・交流成分と回転子巻線電流が時間に対して指数関数的に減少する。タービン発電機では、回転子巻線保持環に制動巻線の電流が分布する。本文の解析ではこれらの電流をすべて考慮する。またすべての鉄心境界は無無限大の透磁率を仮定し、その形状の影響が考慮される三次元磁界計算をする。電磁力は短絡瞬時から任意の時間について計算できるが、

本文では短絡の 0.5 サイクル 後における力の分布を与え、これの結果について論ずる。

また電磁力の大きさを各種容量で計算し、容量との関係を調べる。

2. 磁界分布の計算

筆者は発電機端部磁界のみならず、テレビジョン用電磁偏向コイルやくら(鞍)形コイルなどの三次元磁界問題の解析に適用できる、新しい磁界計算方法を発表した⁽⁶⁾。この方法は、回転曲面に分布する電流を current sheet で代表し、軸対称鉄心境界を正確に考慮できる数値計算法である。

発電機端部の場合には固定子巻線が円すい(錐)形の層内に分布し、回転子巻線端部も、タービン発電機の場合には円筒形の層内に分布している。また鉄心形状も軸対称とみなせるのでこの方法が適用できる。この方法の適用方法については、文献(6)で述べ、各部の磁界分布がかなり正確に計算できることを示した。

2.1 三相突発短絡時の current sheet

三相突発短絡時の電流は付録に示す式で表わされる。短絡直後における最初の 1 サイクル について計算することにし、説明を簡単にするため、指数関数部分は 1 とした上限値の式を示す。無負荷電圧 v からの突発短絡の固定子巻線の 1 相の電流は、単位法で表わすと

$$i_a = \frac{v}{x_d'} [\cos(\omega t + \alpha) - \cos \alpha] \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

この式は定格負荷電流の v/x_d' 倍である交流成分と、 $v/x_d' \cdot \cos \alpha$ の直流成分を含むことを示している。回転子の電流は、ダンパ電流を含めて単位法で次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} i_{rd} &= \frac{v}{x_d'} [1 - \cos \omega t] \\ i_{rq} &= \frac{v}{x_d'} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

この式の値は、界磁巻線電流の定格三相短絡時の値を単位としている。

端部磁界の問題は、端部空間の磁気抵抗が大きく鉄心の磁気飽和特性を無視することができるので、重ねの理が適用でき、これらの各電流成分の作る磁界を合成することによって、端部の磁界分布を

(注) 当社の大容量機では、積層鋼板製の鉄心で固定子鉄心端部への漏れ磁束をシールドしている。

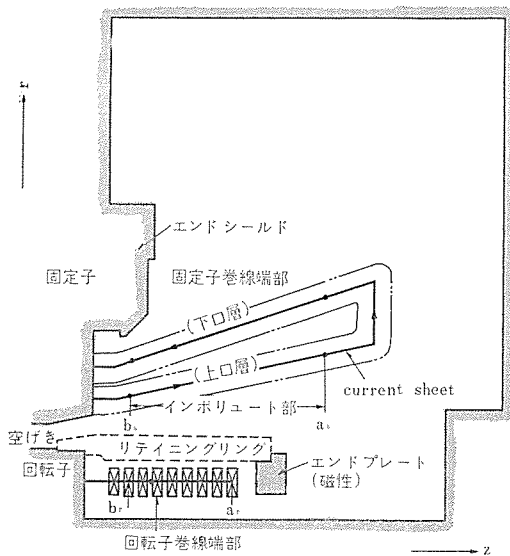


図 2.1 発電機端部の断面 (タービン発電機)
Cross section of end region of a turbine generator.

求める。この場合突発短絡の過渡電流としてうず電流が流れるので、この影響について検討する必要がある。固定子側の構造物に流れるうず電流は、積層鉄心構造のシールドを設けている大型タービン発電機においては、無視することができる。回転子においては、制動巻線と鉄心に短絡初期に大きい過渡電流が流れる。これは端部で回転子保持環内部をう回する。この電流の影響は大きく、この分布の検討を要する。結果としてこれは、後述の検討結果に示すような固定子電流との総合的な磁界計算と実測によって、これらの回転子電流が回転子巻線に分布するものとして計算してよいことがわかる。

(a) 固定子 current sheet

図 2.1 に示すように、固定子巻線層の中央に current sheet を考える。この current sheet の起磁力の分布は、交流成分の定格電流に対する表式で示すと次式になる。

$$i_{st} = i_s \sin(\omega t - \theta) + i_c \cos(\omega t - \theta) \quad (2.3)$$

ここに i_s と i_c は鉄心端よりの軸方向隔り z の関数で

$$0 \leq z < b_s, \quad i_s = I_n \sin \frac{p\pi}{2}, \quad i_c = I_n \cos \frac{p\pi}{2}$$

$$b_s \leq z < a_s, \quad i_s = I_n \sin \left(\frac{a_s - z}{a_s - b_s} \cdot \frac{p\pi}{2} \right), \quad i_c = I_n \cos \left(\frac{a_s - z}{a_s - b_s} \cdot \frac{p\pi}{2} \right)$$

$$a_s \leq z \leq \text{先端} \quad i_s = 0, \quad i_c = I_n$$

である。 $I_n = \sqrt{2} IN_s K_w / 2\pi$, I はコイル 1 本の電流, N_s は固定子スロット数, K_w は巻線係数, p はコイルのピッチ (小数)。

これらの式の詳細は文献(6)に述べている。これらの起磁力は、鉄心出口において第1項の i_s は上口層・下口層ともに同じ大きさであり、第2項は上口層と下口層とで逆向きで値も小さい。したがって漏れ磁束は、主として第1項の起磁力にもとづくものが大きい。先端においては第1項の i_s の値は小さく、第2項の i_c が大きくなるが、上口層と下口層の電流の方向が逆で、全体的に第2項の成分による磁界は小さいが、コイル先端付近の電磁力分布に大きい影響を与える。 θ 方向の電流は、式(2.3)の値の sheet に沿う導関数であり、インボリュート部分に分布する。これの端部の漏れ磁束に大きい影響がある。本文で用いる磁界計算方法では、この電流成分の効果も完全に考慮される三次元磁界の計算を行なえる⁽⁶⁾。

過渡電流に対しては、ここに示した分布の式で i_s, i_c を v/x_d'' 倍、

式(2.3)の $(\omega t - \theta)$ を交流成分では $(\omega t - \theta + \alpha)$ 、直流成分では $(\alpha - \theta)$ とする。このような変形は、先に示した定格電流で計算した磁界分布から短絡時の値を合成する際に行なうことで十分であって、磁界計算は、定格電流時に対して行ない、突発短絡時の値は、定格時の値から合成すればよい。

(b) 回転子の current sheet

図 2.1 に示すように、回転子巻線の端部は 1 枚の current sheet で代表させる。この sheet の電流は固定子に固定した座標で考える

$$i_{rl} = i_r \sin(\omega t - \theta) \quad (2.4)$$

と表わされ、 i_r は軸方向の座標 z に対し

$$0 \leq z < b_r, \quad i_r = \frac{4}{\pi} I_m \cos \frac{\zeta}{2}$$

$$b_r \leq z \leq a_r, \quad i_r = \frac{4}{\pi} I_m \cos \left\{ \frac{\zeta}{2} + \frac{(\pi - \zeta)}{2} \frac{(z - b_r)}{(a_r - b_r)} \right\}$$

と表わされる。ここに I_m は回転子 1 極当たりの起磁力で、

$$I_m = \frac{2}{\pi - \zeta} \left\{ q_2 + \left(\frac{N_r}{4} - 1 \right) q_1 \right\} \cdot I_f \quad (2.5)$$

である。回転子制動巻線の電流の起磁力は、回転子の単位電流が、定格負荷電流の三相短絡時における巻線電流で与えられるので、これらの式に従って求めてさしつかえない。制動巻線電流が端部において保持環に分布することを考慮する場合には、回転子鉄心端の値のみこれらの式で定められ、保持環内の分布は別の方法によらなければならない。この場合は後で詳述する。

2.2 磁界分布の計算

発電機端部等の三次元磁界分布の計算は、文献(9)に述べた差分法によるスカラーポテンシャル場の数値計算法によって行なう。この方法はスカラーポテンシャルを使用することにより計算が単純で、鉄心境界面のポテンシャルが一定のいわゆる第1種の境界条件となるため、計算が容易である。ベクトルポテンシャルを用いる場合には、鉄心境界は主として第2種の境界条件(等ポテンシャル線が境界面に垂直である境界条件)であり、しかもベクトルの3方向成分を扱う必要があり、計算が複雑で容易でない。

図 2.1 に示す端部の鉄心境界は、鉄心内にうず電流がないものとして、鉄心表面の境界は、ポテンシャルすなわち磁位が一定の境界として扱い、すべての鉄心境界形状を正確に考慮する。磁界の基礎微分方程式は、スカラーポテンシャルを V とすると次式となる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (2.6)$$

電流分布は角 θ に対し、正弦波分布とすれば、磁界分布も正弦波の分布となる。したがってポテンシャルは次式の形で表わされる。

$$V = u \cos(\omega t - \theta) \quad (\text{AT}) \quad (2.7)$$

ここに u は座標 (r, z) で定まり、二次元ポテンシャルと呼ぶ。式(2.7)に入れると基礎微分方程式は

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (2.8)$$

となる。一方 current sheet で表わした電流に対しては、この sheet に沿わせた磁殻を考えることにより、特種な境界条件として考慮する⁽⁶⁾。結局式(2.8)に示す簡単な二次元偏微分方程式の計算によって、三次元の磁界問題が計算できる。

磁束密度の分布は $B = -\mu_0 \text{grad } V$ によって計算され、式(2.7)に対応して、次式で求めることができる。ただし μ_0 は透磁率

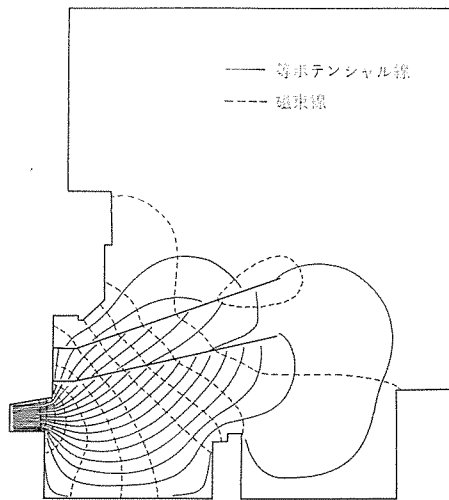


図 2.2 端部磁界計算例 (固定子 Current Sheet i_s にもとづく磁界)
Example of field calculation (field due to stator current sheet i_s).

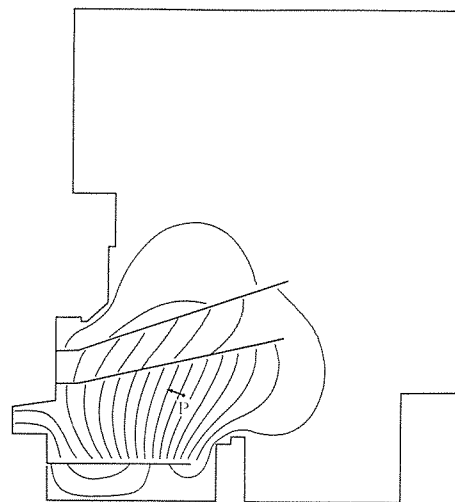


図 2.5 回転子過渡電流が回転子巻線に流れる仮定による磁界計算
(点 P；サーチコイル位置、矢印；磁界の方向)
Field calculation, supposing that the transient current of rotor flows in the rotor winding.

$$\left. \begin{aligned} B_r &= -\mu_0 \frac{\partial u}{\partial r} \cos(\omega t - \theta) \\ B_\theta &= -\mu_0 \frac{u}{r} \sin(\omega t - \theta) \\ B_z &= -\mu_0 \frac{\partial u}{\partial z} \cos(\omega t - \theta) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.9)$$

差分法によるポテンシャル u の計算結果の例を図 2.2 に示す。図は等ポテンシャル線を電子計算機に付属するプロッタで自動的に描かせたもので、磁束の θ 面に平行な r および z 方向の成分は、これらの等ポテンシャル線に垂直である。

巻線層における磁界分布の計算においては、巻線層の分布電流のために磁界分布の変化が大きいため注意を要する。巻線層に沿う磁界成分の変化は大きく、巻線層の表と裏で丁度巻線層の起磁力に比例する値だけ変化する。本文で使用する方法では、巻線層の中央に current sheet を考えているので、この sheet の表と裏の両面で計算した磁界の平均の値を用いる。図 2.3 は計算の一例である。図の (a) は θ 方向の磁束密度 B_θ 、(b) は sheet に沿い、 θ 面内の接

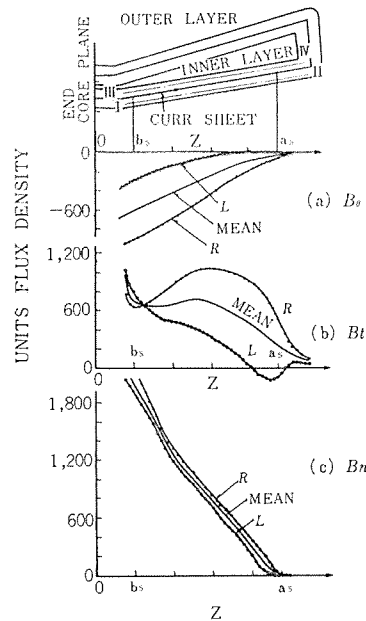


図 2.3 巻線層における磁束密度の計算 (R および L はそれぞれ I-II, III-IV の線上の値)
Calculation of flux density along a winding layer. (R and L denote the values on lines I-II and III-IV, respectively).

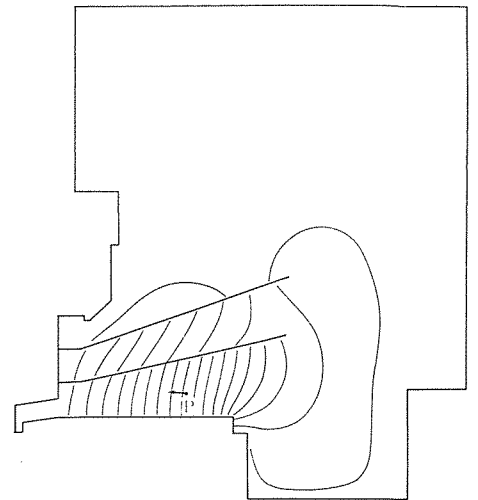


図 2.4 保持環の電流を考慮した磁界計算
(点 P；サーチコイルの位置、矢印；磁界の方向)
Field calculation when the current of retaining ring is taken into consideration. (Point P；position of search coils, arrow；field vector.)

線方向成分 B_t 、(c) は sheet に垂直な成分 B_n の分布を示す。すなわち

$$\left. \begin{aligned} B_\theta &= -\mu_0 \frac{u}{r} \\ B_t &= -\mu_0 \frac{\partial u}{\partial s} \\ B_n &= -\mu_0 \frac{\partial u}{\partial n} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.10)$$

ここに s は sheet に沿う距離、 n は sheet に垂直な距離である。巻線層の電流は、sheet の両側にある厚みでもって均一に分布しているため、これらの平均値を用いて電磁力を計算してよいことは明らかである。

2.3 回転子過渡電流とその影響

前述のように回転子電流は、短絡の初期において制動巻線と保持環に分布するものが大きい。保持環に分布する電流は、制動巻線や回転子鉄心表面を流れてきた電流が、端部で保持環 (リテイニングリング) 内をう回するもので、保持環の表面を流れる。保持環内の電流分布は、保持環の単なる電気伝導によって定まらず、固定子電流にもとづく端部のもれ磁束を、打消するような分布をするはずである。保持環内の交番電流の表皮厚さは 30~40 mm 程度であり、もれ磁束が保持環を透過することはないと考えてもさしつかえはない。すなわち保持環の表面において、磁束が表面に沿った経路をとると考えてもよい。図 2.4 は保持環表面の境界条件を第 2 種境界 ($\partial u / \partial n = 0$) として、保持環内に磁束が浸入しないものとして計算した例である。図 2.5 は過渡電流が回転子巻線に流れるものとして計算した結果である。結果として、図 2.4 と図 2.5 の固定子巻線層における磁界分布の結果はほとんど差がなく、回転子電流が端部において、すべて巻線に分布するものとして電磁力の計算を進めてよい。回転子の電流分布の移行を確かめるために、保持環の近傍 (図 2.4 点 P) にとりつけたサーチコイルによって実測した例を図 2.6 に示す。

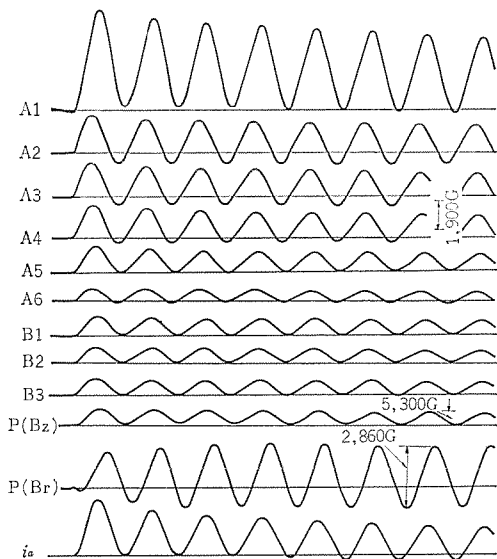


図 2.6 巻線層内の磁界測定波形
A1~B3: 巻線層内サーチコイル (図 3.4 参照)
P: 回転子巻線保持環近傍に設けたサーチコイル (図 2.4 参照)
 i_a : 固定子電流 (a 相)
条件: $v=55\%$ より三相短絡, 2 極 T-G, 試験番号 10
Measured field wave forms at winding layers,
A1~B3: search coils at winding layers (Fig. 3.4),
P: search coils set up near the rotor retaining ring (Fig. 2.4)
 i_a : stator line current.
condition: 3 phase short circuit from no load 55 % voltage,
2 poles T-G, test No. 10.

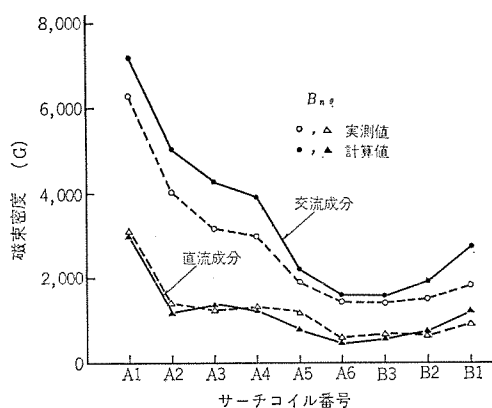


図 2.7 巻線層内磁束密度の測定値と計算値 (B_{θ}) の比較
Comparison between measured values and calculated ones
of flux density at winding layers.

点 P における磁界は、短絡初期においては保持環に電流が分布するため、半径方向の磁束 B_r が小さい。これは図 2.4 と図 2.5 の比較でわかる。図において矢印は磁界の方向を示す。このことは実験結果において B_r の測定波形が初期に小さく、電流が巻線に移行するに従い大きくなっており、図 2.4 と図 2.5 の計算が実験とだいたい合っているといえる。

2.4 固定子巻線内磁界分布の実測

図 2.6 は、三相突発短絡試験において実測した固定子巻線層内の磁束密度波形である。これはサーチコイルを固定子巻線層内にそう入し、高性能の積分器を介して測定したものである。サーチコイルは固定子コイルに垂直な成分で、巻線層の厚手方向の平均値を測定するように配慮しており、短絡の開始時点に、ちょうど磁化軸が一致する巻線相の中性点側にサーチコイルをそう入している。図 2.7 は計算結果と比較している。交流分は初期において小さい時定数で若干

減少するが、時間 $t=0$ の値を実測から求める際、この減少分の見積に誤差を生じる。このため交流分では差が見られるが、計算と実測はよく合っている。

3. 電磁力の分布

3.1 計算法

電磁力の分布は、先に示した巻線内の磁束密度から次の式によって計算される。

$$F = I \times B \text{ (N/m)} \quad (3.1)$$

ここに I はコイルの電流で、力を計算するコイル部分の方向を表わすベクトルと電流の積である。

力の表現は、コイルに垂直な力を巻線層に垂直な成分 F_{nr} と巻線層に沿う方向成分 $F_{n\theta}$ で表わすのが適当である。 F_{nr} はほぼ半径方向の力であり、 $F_{n\theta}$ はほぼ円周方向の力を表わしているが、インボリュート形のわん(彎)曲部における $F_{n\theta}$ はかなり円周方向の成分とは異なってくる。この表現方法は、コイル相互の結合方法と半径方向の支持方法の検討や、骨組構造模擬による強度計算に適している。

磁束密度の巻線層に垂直な成分を B_{nr} 、巻線層に沿う方向でコイルに垂直な成分を $B_{n\theta}$ とすれば、式 (3.1) は次式に書ける。

$$\left. \begin{aligned} F_{nr} &= -i B_{n\theta} \text{ (N/m)} \\ F_{n\theta} &= i B_{nr} \text{ (N/m)} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ただし i はコイルの過渡電流であり、 $B_{n\theta}$ 、 B_{nr} もそれに応じた値である。

磁束密度の分布の表現を、固定子定格電流における計算結果と定格電流三相短絡時の回転子励磁に対する結果から求める。式 (2.3) の固定子 current sheet の第 1 項と第 2 項にもとづく結果に、それぞれ添字 s, c を付し、式 (2.4) の回転子励磁に対する結果に添字 m を付して示すと、磁束密度 $B_{n\theta}$ と B_{nr} は次式の形で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} B_{nr} &= \frac{v}{x_d'} [(R_s + R_m) \{ \cos(\omega t + \alpha - \theta) - \cos(\alpha - \theta) \} \\ &\quad + R_c \{ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \}] \\ B_{n\theta} &= \frac{v}{x_d'} [-(S_s + S_m) \sin \gamma + T_c \cos \gamma] \{ \cos(\omega t + \alpha - \theta) - \cos(\alpha - \theta) \} \\ &\quad + \{ (T_s + T_m) \cos \gamma - S_c \sin \gamma \} \{ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta) \} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

ただし、 R , S , T は、各電流成分に対する磁界計算で得られた二次元ポテンシャルから求められるもので、式 (2.10) と同様に

$$R = -\mu_0 \frac{\partial u}{\partial n}, S = -\mu_0 \frac{\partial u}{\partial s}, T = -\mu_0 \frac{u}{r}$$

によって求めるものであり、 γ は力を求めるコイル部分の θ 方向となす角であり、 θ は力を求める位置の角度座標である。 α は a 相を基準としたときの短絡開始時の回転子座標である。

固定子巻線の電流は巻線の相帯の番号を δ 、位相を θ_δ で表わすと

$$i = \frac{v}{x_d'} I_L \{ \cos(\omega t + \alpha - \theta_\delta) - \cos(\alpha - \theta_\delta) \} \quad (3.4)$$

ここに $\delta=1, 2, \dots, 6$ に対し、 $\theta_\delta = (\delta-1)\pi/6$ であり、 θ の基準は $\delta=1$ の相帯の磁化軸にとる。 I_L はコイルの電流である。

式 (3.3) と式 (3.4) の積によって電磁力が与えられるわけであるが、複雑であるので電磁力の表式は省略する。

3.2 巻線層に垂直な力

電磁力の最大は、ほぼ短絡のハーフサイクル後 ($\omega t=180^\circ$) のときであり、このときの電磁力の分布の計算例を図 3.1 に示す。結果はコイルに沿う単位長さ (1 m) 当たりの力で示している。この電磁力

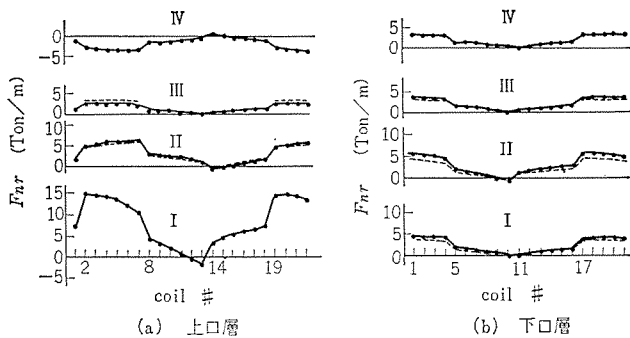


図 3.1 巻線層に垂直な力
条件: $v=100\%$ より三相短絡後 0.5 サイクル, 2 極 T-G
Force perpendicular to winding layer. Condition; after half cycle of 3 phase short circuit from no-load 100% voltage.

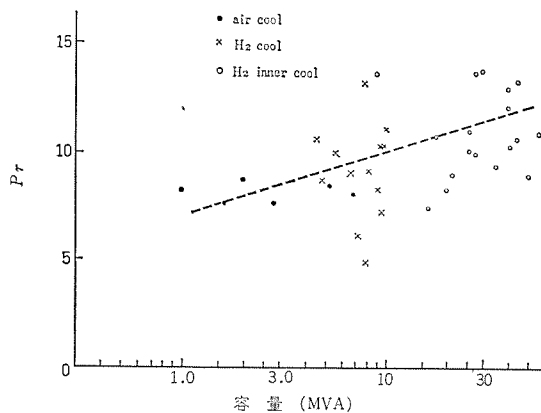


図 3.2 各種容量のタービン発電機における巻線層に働く圧力上限値
Maximum values of electro-magnetic pressure working on end-winding layer in various turbine generators.

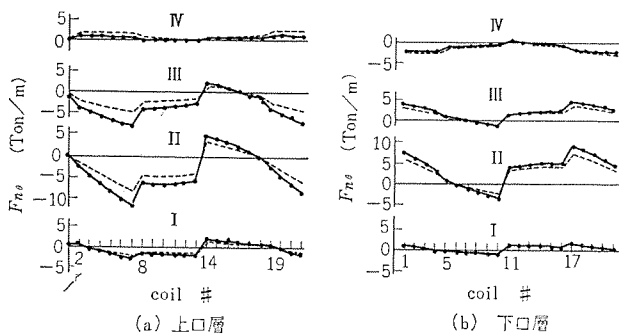


図 3.3 巻線層に沿ってコイルに垂直な力 F_{no}
($v=100\%$ より三相短絡, 0.5 サイクル後)
Force perpendicular to coil bar and parallel with winding layer; F_{no} (after 0.5 cycle from 3-phase short circuit from no-load 100% voltage).

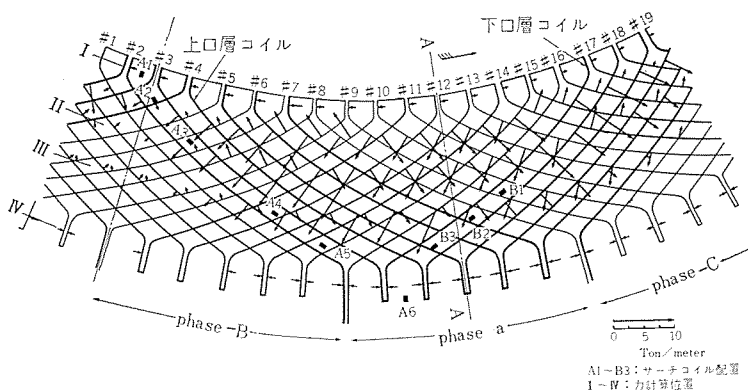


図 3.4 巻線層に沿ってコイルに垂直な力 F_{no} の分布
Distribution of the force F_{no} .

はスロット出口で最大で、上口層と下口層はともに外径方向が主で、内径方向の力は上口層の先端のみで、その力はそれほど大きいものではなく、外径方向の力に耐えるような支持構造としなければならない。この電磁力は主として円周方向の磁束密度の分布に関係する。周方向の磁界は境界条件の影響はあまり受けないので、エンドシールドと回転子のエンドプレート(図 2.1 参照)の影響はあまり現われていない。スロット出口における電磁力は、最大を与えることは多くの機械の計算結果に見られ、この部分の磁束密度は単に次のような計算式で与えることができた。定格電流のとき上口層では

$$B_{\theta} = \frac{3\mu_0 I_n}{2 r_s} \sin\left(\frac{p\pi}{2}\right) \sin(\omega t - \theta) \quad (\text{T}) \quad (3.5)$$

ここに r_s はスロット出口におけるコイルの半径

したがって三相突発短絡時に巻線層に働く半径方向の圧力の上限は、

$$P_r = 6 \left(\frac{v}{x_d''} \right)^2 \left(\frac{I_n}{r_s} \right)^2 \sin^2\left(\frac{p\pi}{2}\right) \quad (\text{N/m}^2) \quad (3.6)$$

で与えられ、電磁力の大きさの目安が得られる。図 3.2 は種々の機械の圧力上限値を示す。容量増加に従って電磁力も増加する傾向にあるが、容量の小さい機械でも力の大きいものもある。固定子のスロット数を増加させた場合コイル 1 本に働く力は小さくなるが、コイルの剛性は弱くなるので、支持強度のうえからは巻線層に働く圧力で比較検討してよい。

3.3 巻線層に沿う電磁力

巻線層に働く円周方向の力すなわちトルクは、端部巻線の全体を見れば大きなものではない。このような方向の力としては、むしろ巻線層に沿う方向でコイルに垂直な力を扱うほうが支持構造の検討のうえで適当であり、この方向の力は、コイル相互間の締結部分の強度の検討に重要である。

図 3.3 は結果の一例で、短絡後 $\omega t=180^\circ$ における結果を示す。この力は巻線層に垂直な磁束密度 B_{nr} にもとづき、境界形状の影響が大きい。固定子鉄心端部の磁性のエンドシールドと回転子のエンドプレートのない場合の結果と比較すると、これらの端部構造物の影響はかなり大きいことがわかる。

図 3.4 は巻線層の円すいを展開し、上口層と下口層のコイルに働く力の分布を矢印で示したもので、各部の電磁力の分布が判断できよう。下口層の力の分布は、短絡開始時の磁化軸 A-A を中心に上口層のそれを裏返したような分布となっており、上口と下口とで力の大きさには大きな差がなく、巻線端部に働くトルクは問題になるほど大きくない。

またこれらは軸方向外向きで巻線を引き出そうとする力である。この外向きの力は、ここでは $\omega t=180^\circ$ の結果を示したが、何の時間においても外向きであることは、この力が円周方向の電流成分によるもので、磁束密度 B_{nr} が主として円周方向の電流成分の起磁力にもとづくことから理解できる。

4. む す び

本文では、磁性の端部構造物の影響を考慮に入れられる固定子巻線の電磁力の新しい計算法を示した。非磁性の回転子巻線保持環の 2 極タービン発電機を例にとり、適用方法を示し、電磁力の分布を、巻線層に垂直な力 F_{nr} と巻線層に沿ってコイルに垂直な力 F_{no} で表現する方法を示した。力 F_{nr} に対しては磁性構造物の影響が小さく、力 F_{no} に対しては磁性構造物

の影響が大きく、これを考慮しない場合より30~40%大きい力となる。

タービン発電機の回転子保持環に流れる過渡電流は、回転子巻線に流れるものとして計算してよいことを実測と計算とによって確認した。磁性保持環の場合については本文では触れなかったが、飽和の影響を考慮した手法が必要であり⁽¹⁰⁾、今後に残された問題である。

スロット出口における上層巻線に働く半径方向の電磁力は、最も大きい。各種の機械における電磁力は、これによっておおざっぱな目安を立てることができる。本文ではこの力の計算式を示し、種々の容量のタービン発電機において調べた例を示した。巻線層に働く圧力として表わしたこの力は、容量に比例して若干増加する。しかし設計内容によって、小容量機においても大きい値となり得るものであり、容量が大きくても必ずしも電磁力が大きいとはいえない。

突発短絡時の端部巻線に働く電磁力に対する巻線支持の強度の検討と、合理的な支持構造の検討を進める必要がある。本文では短絡後 $\omega t=180^\circ$ における電磁力分布を示したが、各時点の過渡電流の変化を含めた電磁力の計算を行なうことは、本文の方法では比較的容易であり、動的な支持構造と巻線の内部力の解析に適用できる。

最後に実測を担当していただいた当所谷技師に感謝するとともに、

付録 三相突発短絡時の電流分布

文献(7)の式(145)に与えられている三相突発短絡電流の式から、無負荷からの短絡における式を求めると次式となる。

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{x_d} \right] v \cos \omega t \\ &\quad - \frac{1}{x_d''} e^{-t/T_d''} v \cos \omega t \\ i_q &= \frac{1}{x_q} e^{-t/T_q} v \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots (付 \cdot 1)$$

三相のうちの一相であるa相の固定子電流は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{x_d} \right] v \cos (\omega t + \alpha) \\ &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_q''} + \frac{1}{x_d''} \right) e^{-t/T_q} v \cos \alpha \\ &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_d''} \right) e^{-t/T_q} v \cos (2\omega t + \alpha) \end{aligned} \right\} \dots\dots (付 \cdot 2)$$

これらの式の記号は文献(8)の例に従った。他の相の電流は、上式の α のかわりに $\alpha-(2\pi/3)$ 、 $\alpha+(2\pi/3)$ とおけばよい。式(付・1)は、制動巻線などを含めた回転子の電流にほぼ等しいが、抵抗を無視して正確に書けば次式となる。

本研究推進に当たり種々ご検討いただき、ご協力いただいた関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) P. J. Lawrenson : Proc. IEE, 112, No. 6, 1,144 (1965-6)
- (2) H. Ballus : ETZ-A, 90, No. 21, 539 (1969)
- (3) D. Harrington : TAIEE (III), 71, 849 (1952)
- (4) J. A. Tegopoulos : IEEE Trans., PAS-85, No. 2, 105 (1966-2)
- (5) J. A. Tegopoulos : IEEE Trans., PAS-85, No. 2, 114 (1966-2)
- (6) T. Nomura : IEEE, Summer Meeting, paper No. 71-CP-PWR (July, 1971)
- (7) C. Concordia : Synchronous Machines (1951), John Wiley and Sons Inc.
- (8) 電気学会編：電気工学ハンドブック(昭26), オーム社
- (9) 野村：電学誌, 91, No. 2, 155 (昭46-2)
- (10) J. B. Young, D. H. Tompsett : Proc. IEE, 102, Part A, No. 2, 101 (1955-4)

$$\left. \begin{aligned} i_{rd} &= \left(\frac{x_d}{x_d - x_l} \right) i_d \\ i_{rq} &= \left(\frac{x_q}{x_q - x_l} \right) i_q \end{aligned} \right\} \dots\dots (付 \cdot 3)$$

ただし、 i_{rd} と i_{rq} は、制動巻線の電流を含めた回転子電流の直軸および横軸成分で、単位は固定子定格負荷電流を1としている。

短絡直後の1サイクルについて検討することにし、指数関数項を1とみなし、リアクタンス x_q 、 x_d'' はそれぞれ x_d と x_d'' に等しいとみなし、回転子の電流は、定格電流三相短絡における巻線電流を単位とし、固定子電流は定格電流を単位とすれば、

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \frac{v}{x_d''} [\cos (\omega t + \alpha) - \cos \alpha] \dots\dots (付 \cdot 4) \\ i_{rd} &= \frac{v}{x_d''} [1 - \cos \omega t] \\ i_{rq} &= \frac{v}{x_d''} \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots (付 \cdot 5)$$

となる。これは突発短絡時の上限であり、この電流によって計算した力はかなり大きめの値となる。

プラズマ ディスプレイ

倉橋 浩一郎*・鳥 取 浩*・磯貝 文彦*

Plasma Display

Central Research Laboratory Kōichirō KURAHASHI・Hiroshi TOTTORI・Fumihiko ISOGAI

Plasma display having its memory function in the panel itself is considered to have bright prospect as panel type matrix display. A plasma panel that is an indicating element of the display has been built for trial and its characteristics have been studied by experiment. As for the driving voltage, it has been confirmed that the voltage can be made below 200 V by using leed which has a large secondary electron emission factor. Regarding the resolution, it has been found that the interval of picture elements can be made 0.3 mm. Also character display has been made for trial by the use of a plasma panel 128×128 picture element for trial. This article is a brief report on them.

1. ま え が き

表示装置は情報化時代の今日、必要不可欠なものとなっている。現在おもに使われている CRT (Cathode Ray Tube) は、三次元的に大きく、表示精度が悪いという欠点がある。このために平板形マトリクスディスプレイ(matrix display)として EL(Electro Luminescence)・液晶(Liquid Crystal)・プラズマパネル(Plasma Panel)が各所で研究されている。なかでもプラズマパネルは、パネル自身にメモリ機能を有するという他の表示素子には見られないすぐれた特長を持っており、計算機の端末機器用として有望視されている。プラズマパネルは1964年、米国 Illinois 大学の Sllotom Bitzer 教授等により発明された、ガス放電による発光を利用した表示素子である。発明以来、点灯電圧の低下、高分解能化、大形化の研究が行なわれており、現在では中間表示方式、カラー化の研究も行なわれている。

プラズマパネルの構造上の特長は、電極と放電ガス空間との間にガラス等の絶縁層をそう入した点にある。この絶縁層は、放電時のスパッタによる電極消耗を防止し、パネルの寿命を長くする。また、パネル自身にメモリ機能を持たせる働きもする。このほかにプラズマパネルは輝度が大きく、パネルが透明にできるので、他の画像の重畳が可能であるマトリクスディスプレイであり、表示精度がよい、消費電力が少ない、構造が簡単である等の特長を持っている。ここではわれわれが7×7絵素の小形パネルを試作して、実測したプラズマパネルの諸特性と、128×128絵素の大形パネルを用いて、モデル試作したキャラクタディスプレイ装置について述べる。

2. 各種表示素子の特性比較

表2.1に各種表示素子の特性を示す。この表でもわかるように、

プラズマパネルの分解能以外の特性は、他の表示素子に比べすべてすぐれている。分解能については高分解能 CRT に劣るが、家庭用のテレビ受像機程度の分解能は十分に得られる。

3. プラズマパネルの構造と動作原理

3.1 構造

現在試作されているプラズマパネルの構造を図3.1に示す。図に示すように放電ガス空間をはさんで、両側にそれぞれ絶縁層・電極基板ガラスの順に配置した構造である。放電間隔は通常100~200μmである。基板ガラスは、放電ガス空間を真空にしたときに強度的に耐え得るように、また封入ガスの圧力を大気圧以下にしても変形しないように、5~10mmの肉厚ガラスが用いられている。電極は、数十μm幅の金属膜電極を基板ガラスの上に形成する。絶縁層は、低融点ガラスを電極付基板ガラス上に数十μmの厚さにコートしている。この低融点ガラスの材質は後で述べるように、点灯電圧を決める重要な因子となる。放電ガス空間には、点灯電圧が低いNeを主成分にした混合ガスを封入している。128×128絵素のプラズマパネルの写真を図3.2に示す。

3.2 動作原理

前にも述べたようにプラズマパネルは、ガス放電による発光を利用した表示パネルである。このパネルの等価回路は、図3.3に示したように3個のコンデンサを直列に接続したものである。図でC₁C₃は絶縁ガラス層の静電容量で、C₂は放電セルの静電容量である。一般にC₁C₃は、等しくC₂の十数倍の静電容量をもっているため、電極に印加された電圧(V_d)の80~90%が放電セル(C₂)に印加される。X軸・Y軸電極を通して、放電セルに点灯電圧(放電開始電圧V_f)以上の電圧を印加すると、ガス放電を生じる。放電時の発光はおも

表 2.1 各種表示素子の特性比較 (NIKKEI ELECTRONICS 1971・6より)
Characteristic features of various display devices.

	図形精度	分解能		記憶機能	平面度	大形化	投影重量性	輝度 (FL)	消費電力	寿命	構造
		セル寸法	ピッチの例								
プラズマパネル	マトリクス アレイの精度 による	0.3φ	0.4*	自己記憶	良	可	良	200以上	200μW/セル	数万H	平板
発光ダイオード	マトリクス アレイの精度 による	0.25	0.5	外部記憶	良	困難	劣	100	0.2W/ピクセル	長い	平板 モザイク
EL	マトリクス アレイの精度 による	0.95	1.2	外部記憶	良	可	劣	5	25mW/セル	短い	平板 モザイク
CRT	ひずみあり	0.04~0.5		残光記憶 0.1μs~10s 外部記憶	不良	限界あり	困難	50~100	数W	5,000H	フラスコ状

* 資料では0.6であったがすでにピッチ0.4mmのパネルも製作されている

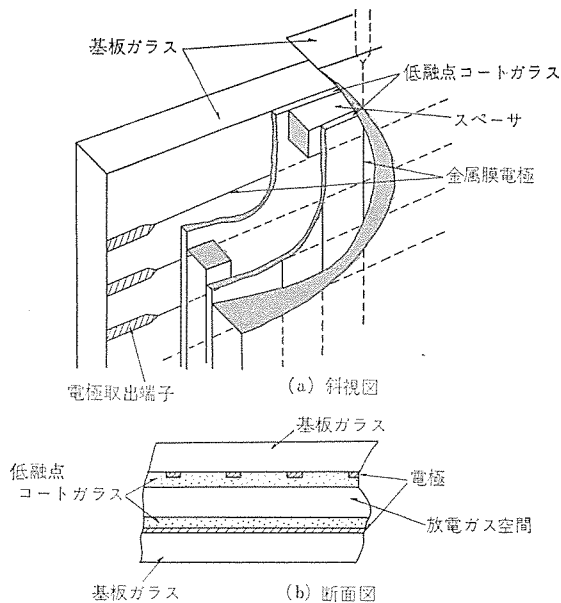


図 3.1 プラズマパネルの構造
Plasma display panel construction.

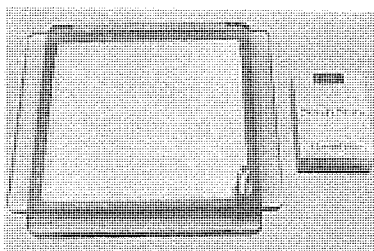


図 3.2 128×128 画素のプラズマパネル
Plasma panel with 128×128 elements.

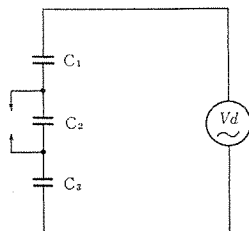


図 3.3 プラズマパネルの等価回路
Equivalent circuit model of a plasma panel element.

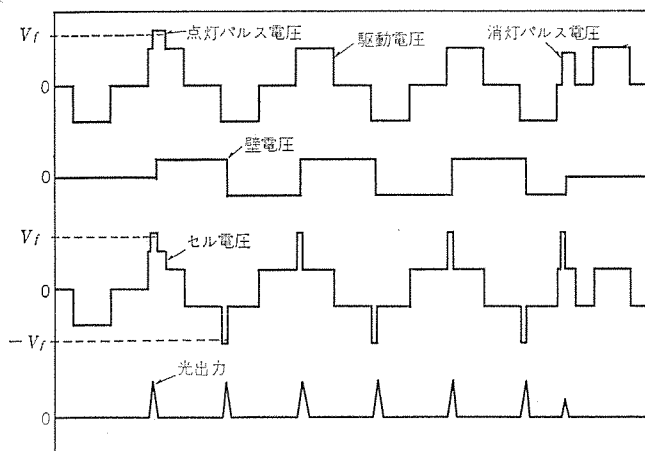


図 3.4 各部電圧・光出力波形
Voltage waves and light output.

に電子の励起作用によるものである。

放電によって生じた多量の電子やイオンは、電界で加速され、電子は陽極側へ、陽イオンは陰極側へそれぞれ移動する。通常のガス放電においては、電子・陽イオンは陽極・陰極へそれぞれ流入するが、プラズマパネルにおいては、電極と放電ガス空間とがガラスで絶縁されているので、電子やイオンは電極まで到達できず絶縁ガラス壁に蓄積される。蓄積された電荷によって生ずる電圧（以後壁電圧 V_N と呼ぶ）は、電極を通して印加されている電圧を打消すように働き、放電を消滅させる。ここで駆動電圧に交流電圧を用いると、放電が消滅した後電極に印加される電圧の極性は、反転し壁電圧と同極性になる。したがって放電セルには、駆動電圧に壁電圧を加えた電圧が印加される。

このことから点灯電圧より低い交流駆動電圧を用いた場合、そのままでは放電しないが、一度放電を起こしてやれば、壁電圧により以後放電は間欠的に持続することがわかる。放電（発光）をとめるには、壁電圧が十分にできないような小放電を起こしてやればよい。図 3.4 に点灯・消灯時に電極間に印加される電圧（駆動電圧と点灯・消灯パルス電圧）、壁電圧、放電セルに印加される電圧、それに発光波形を示す。

4. 点灯電圧

プラズマパネルの点灯電圧 (V_f) は、ガス放電現象でいう放電開始電圧にあたる。放電開始電圧は、すでに放電ハンドブックなどにも述べられているように、持続放電が開始する電圧で、つぎの式で表わされる。

$$V_f = B \frac{pl}{\log \left\{ \frac{Apl}{\log(1+\gamma)} \right\}} \quad (4.1)$$

ここに A, B : 気体の種類によって決まる定数

p : 封入気体の圧力

l : 放電間げき

γ : 二次電子放出係数

気体の種類によって決まる定数 A, B は、放電間げき内の電界強度と、その気体空間中を飛行する電子が気体を電離する衝突電離係数との関係式に含まれる定数である。この関係はつぎの式で表わされる。

$$\alpha/p = A \exp(-B/Ep)$$

ここに α は衝突電離係数、 E は電界である。この関係は、すでに種々のガスについて図 4.1 に示したような実測データがある。

二次電子放出係数は、放電によって生じた光・イオン・準安定原子などが陰極に衝突した際に、陰極から電子が放出する割合を表わす係数である。プラズマパネルにおける放電の場合、1回の放電は $1 \mu s$ 以下で終了するのが普通で、イオンや準安定原子は、この短い時間では後に述べるように陰極にほとんど到達しないと考えられる。したがって、光が絶縁ガラスに衝突したときの二次電子放出係数が重要である。この値は、陰極面の材質によって大幅に異なり $5 \times 10^{-5} \sim 0.1$ の範囲の値が報告されている。

封入気体は図 4.1 のデータから放電圧が低いと考えられる Ne であると仮定し、圧力と放電間げきとの積 pl を、プラズマパネルでよく用いられる 2, 4, 6, 8, 12, 18 cm torr に選び、放電開始電圧と二次電子放出係数 γ との関係式を、式 (4.1) から算出すると図 4.2 に示した値になる。この結果からプラズマパネルの点灯電圧を下げる

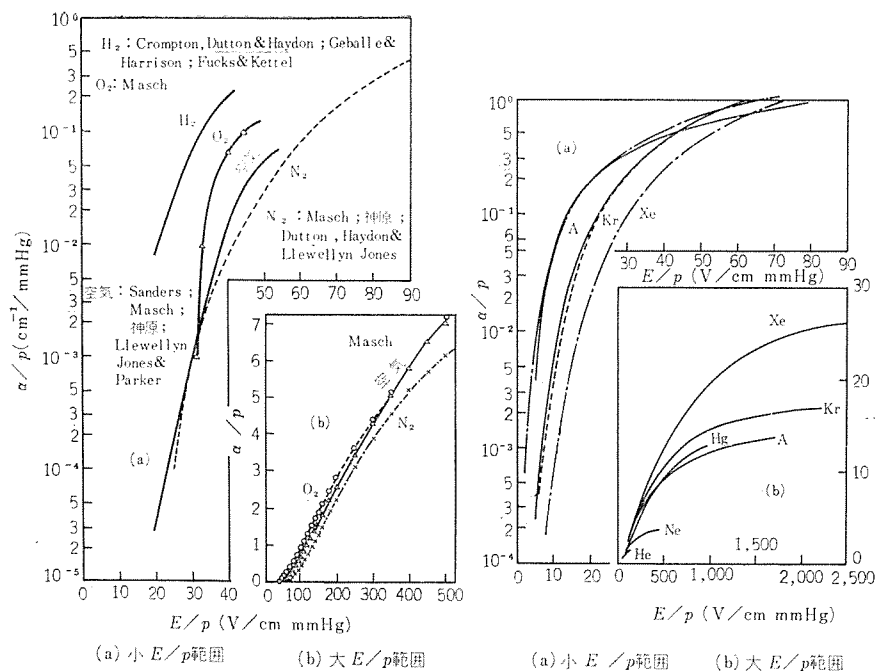


図 4.1 各種ガスの衝突電離係数 (放電ハンドブックより)
Coefficients of collision ionization.

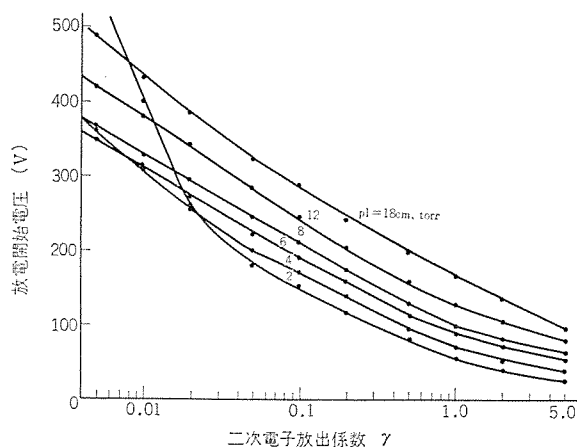


図 4.2 放電開始電圧と二次電子放出係数
Firing voltage vs. coefficient of secondary electron emission.

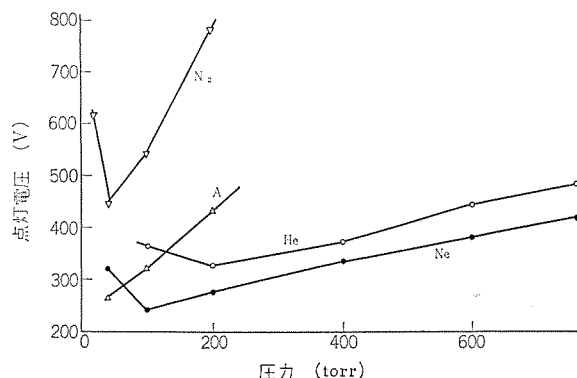


図 4.3 各種気体の点灯電圧 (放電間げき 220 μm, 電源周波数 200 kHz 正弦波)
Firing voltages of various gases.

には、まず二次電子放出係数を大きくすることが効果的である。二次電子放出係数が大きいガラスとしては、鉛ガラスが知られており、鉛含有量が高い鉛ガラスを用いると、点灯電圧は、180 V 以下になることを確認した。つぎに図 4.2 から圧力と放電間げきの積 pl を小さくすると、放電開始電圧は低くなることがわかる。ただし二次

電子放出係数 γ が大きいパネルの場合、 pl の値を小さくすると、かえって放電開始電圧は高くなるので注意を要する。

なお Ne, He, Ar, N_2 の各気体を試作したプラズマパネルに封入し、点灯電圧を実測した結果を図 4.3 に示した。圧力が高い領域では Ne, He の順に点灯電圧は低かった。さらに同じ条件で Ne+Ar (1%) の混合ガスにすると、圧力 400 torr で 200 V 以下の点灯電圧にすることができた。

5. メモリ機能

プラズマパネルのメモリ機能は、前にも述べたように放電によって発生したイオンおよび電子が絶縁ガラス壁に蓄積し、壁電圧を形成することに起因する。以後メモリ機能の大小を表わすために、メモリメリット (Memory merit: M) を次式で定義する。

$$M = \{(V_f - V_s)/V_f\} \times 100 = (V_w/V_f) \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで V_s は一度放電を起こしてやれば、以後間欠的な放電を持続できる駆動電圧の最小値である。メモリメリットを大きくするためには、放電終了時に形成する壁電圧を大きくし、次の放電開始時点までの減衰を小さくしなければならない。壁電圧を大きくするためには、1回の放電で発生するイオン・電子の総数を増さなければならない。このためにはセル電圧が点灯電圧以下になっても、陰極近傍のイオンによる空間電荷で放電が持続することが重要と考えられる。ここでわれわれが実測したメモリメリットの値を図 5.1 に示す。実験結果からメモリメリットは、圧力および駆動電圧の周波数によって変化することがわかる。

まずメモリメリットがある周波数でピークを持つのは、高周波側においては、放電終了時に残っているイオンが、セル電圧の極性反転時までに陰極壁へ到達できず、逆に陽極壁へ到達し電子と中和して壁電圧を減少するからであり、低周波側においては、一度形成された壁電荷がガラス壁を通しての放電等で減衰するからであろうと推察される。駆動電圧に正弦波を用い、放電終了時は常に一定の壁電圧が形成されていると仮定すると、イオンの移動距離 (L) は次式で表わされる。

$$L = \int_0^t \mu E dt = \mu \int_0^t \left(\frac{V_d}{l} \sin(\omega t + \theta) - \frac{V_w}{l} \right) dt \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ここに μ はイオンの移動度、 ω は駆動電圧の角周波数、 θ は放電終了時の駆動電圧の位相である。Ne を 760 torr 封入し、 $l=150 \mu\text{m}$ 、 $V_d=300 \text{ V}$ 、 $V_w=200 \text{ V}$ と仮定した場合の、イオンの移動距離の計算

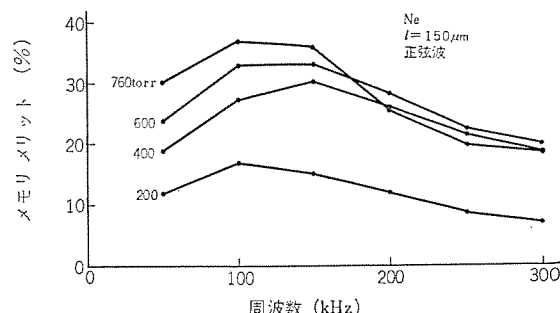


図 5.1 圧力とメモリメリット
Memory merit vs. gas pressure.

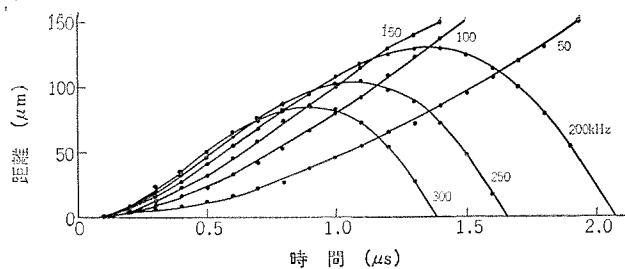


図 5.2 周波数とイオンの移動距離
Movement of ion vs. frequency.

結果を図 5.2 に示す。この図から放電終了時に陽極近傍にあったイオンは、周波数が 200 kHz 程度になると陰極壁へ到達しなくなると推定される。圧力が高くなるとメモリメリットが大きくなるのは、放電によって発生するイオンおよび電子の数が増し、壁電荷が多くなるからであると考えられる。また、圧力が高くなるとイオンの移動速度が遅くなり、しかもイオンの数も増すので、空間電荷がたまりやすく、放電の持続を助長するのの一因であろう。

6. 分 解 能

現在用いられている構造のプラズマパネルの分解能は、放電の広がりによって決まり電極ピッチで表わされる。分解能に関係するおもな因子は、ガスの種類と圧力およびパネルの幾何学的な寸法によって決まる放電間引き内の電位分布である。プラズマパネルの場合、封入ガスは、点灯電圧を下げるために Ne を主成分にした気体に限られ、圧力は、メモリマージンを増すために高いほうがよい。したがって分解能をあげる（電極ピッチを小さくする）ために、自由に変えることができる因子は、パネルの幾何学的な寸法に限られる。パネルの幾何学的寸法のうち、放電間引き内の電位分布に大きな影響を及ぼす放電間引き・電極幅・電極ピッチの三つのパラメータを、種々に変えたパネルを試作し、分解能の有無を実験的に確認する一方、各パネルに相当する二次元模型を作り、電位分布を実測した。この電位分布の実測値の一例を図 6.1 に示す。

パネル内の電位分布は、実測したすべてについて図 6.1 に AA' 線で示した部分の電界が最も強く、DD' 線で示した二つの電極の中

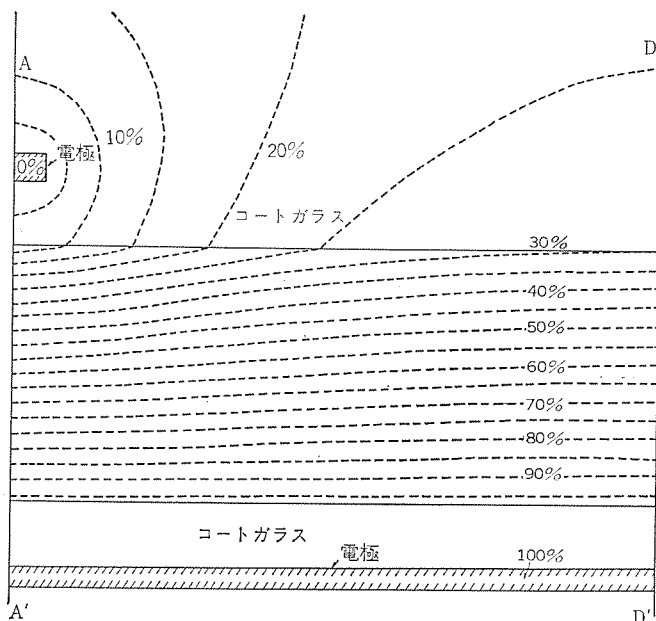


図 6.1 プラズマパネルの電位分布
Electric field distribution in the plasma panel element.

表 6.1 分解能と電位傾度比
Resolution vs. electric field distribution ratio.

電 位 傾 度 比 (図 6.1 の D 部と A 部の比)	分 解 能 の 有 無	
	○有	×無
0.700	○	
0.705	○	
0.763	○	
0.768	○	
0.770	△	
0.773	△	
0.870	×	
0.960	×	
0.976	×	

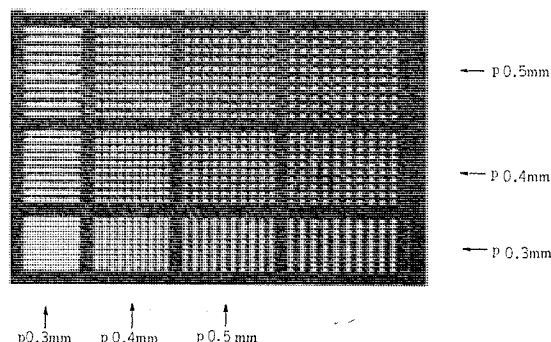


図 6.2 高分解能パネルの点灯状態
High resolution plasma panel.

間点では最も弱い電界が得られた。この AA' 線から DD' 線への電界の変化の状態は、単調減少であり、不連続点や特に高い点はなかった。この結果から、DD' 線部の電界に対する AA' 線部の電界の比が小さいほど、電極への電界集中度は強いといえる。また電界集中度が高いほど高分解能が得られると判断されるので、上記電界の比を分解能有無の目安にすることにした。表 6.1 に二次元模型の電位分布から算出した電界の比と、実験的に確認した分解能有無の関係を示す。この表から電界の比が 0.77 より小さければ分解能はあり、この値より大きければ分解能はなくなることがわかる。Ne を主成分にしたガスの場合、電界の比が 0.77 より小さくなるようにパネルの幾何学的寸法を決めて設計すれば、分解能は得られるものと考えられる。われわれが試作した 0.3, 0.4, 0.5 mm ピッチの絵素を持つ高分解能パネルの点灯状態を、図 6.2 に示す。

7. キャラクタディスプレイ装置

7.1 装置の概要

今回試作したキャラクタディスプレイ装置の仕様を表 7.1 に、表示部外観を図 7.1 に示す。また文字を表示中のパネルの写真を図 7.2 に示す。文字・数字の書込み・消去は、すべてキーボードからの信号によって行なわれる。キャラクタディスプレイ装置にプラズマパネルを用いた場合、CRT を用いた場合に比べ次のような特長をもっている。

- (1) 表示部が平板であり、奥行きが短くできる。
- (2) パネル自身にメモリ機能があるので、外部のリフレッシュメモリ回路が不要になる。
- (3) 消費電力が小さい。(点灯持続に要する消費電力：300 μW/絵素)

7.2 駆動回路

今回試作したプラズマパネルを用いたキャラクタディスプレイ装置の回路構成を、図 7.3 に示す。図 7.1 に示したように表示部とキーボードは一体構造とし、コントロール（論理回路）部は一つのケースに入れて

表 7.1 キャラクタディスプレイ装置の仕様
Specification of the experimental character display model.

表示素子	プラズマパネル (128×128 絵素, ピッチ 1.0 mm)
画面寸法	128×128 mm
表示文字数	294 字 (14 行×21 列)
文字の大きさ	7×5 mm
表示字種	カナ文字 (46), 英字 (26), 数字 (10), 記号 (32) 合計 114 種
表示色	赤だいだい (ネオンの放電発光色)
表示方式	LINE AT A TIME 方式
文字表示方式	ドット方式 (7×5 点)
キーボード	英字, 数字, カナ文字, カナ記号, シフトキー, 編集キー, カーソル操作キー
カーソル機能	スキャン (ライト, ダウン), ホーム
編集機能	LINE ERASE, DISPLAY ERASE

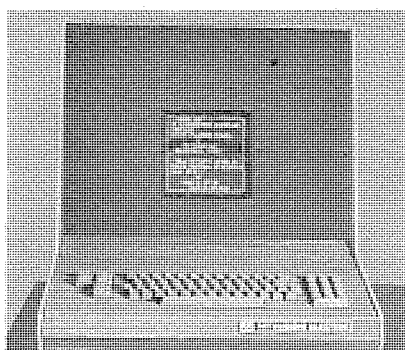


図 7.1 キャラクタディスプレイ装置の表示部外観
Exterior view of the experimental display.



図 7.2 文字を表示中のプラズマパネル
Characters displayed on the experimental display.

ある。図 7.3 において、信号は次のように伝送される。まずキーボードで発生したキャラクタコード信号は、文字パターン発生回路へ、ストロブ信号は、書込み消去信号発生回路へ伝わる。ストロブ信号により発生した書込み消去信号は、点灯・消灯パルス用信号発生回路へ伝わり、点灯・消灯パルス用信号を発生する。書込み消去信号はクロックパルス発生回路へも伝わり、この回路を動作させる。また書込み消去信号発生回路で発生するカーソル消去信号は、位置指定回路へも伝わり、クロック信号として働く。クロックパルス発生回路から文字パターン発生回路へは、文字パターンの行を指定するアドレス信号が送られている。点灯・消灯パルス用信号は、クロックパルス発生回路・文字パターン発生回路・位置指定回路を経て X 軸 Y 軸書込み回路に伝わり、

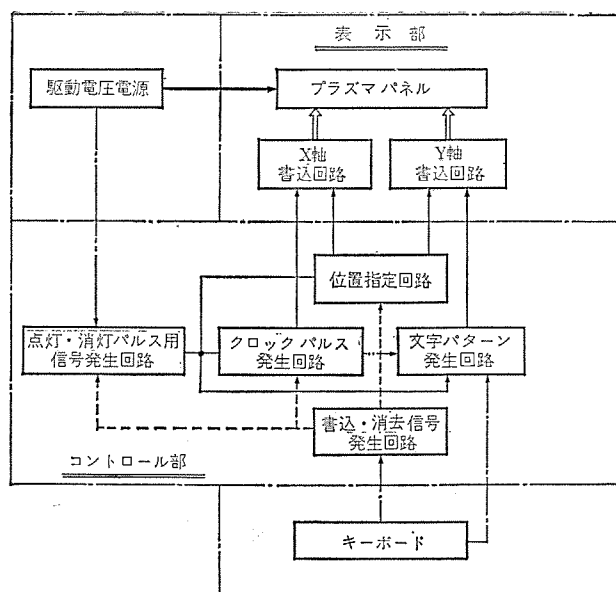


図 7.3 キャラクタディスプレイ装置の回路構成
Block diagram of the experimental display.

点灯・消灯パルス電圧を発生させている。駆動電圧は常時パネルに印加されており、そのモニタ信号が点灯・消灯パルス用信号のトリガ用として、点灯・消灯パルス用信号発生回路に送られている。

8. む す び

プラズマパネルの原理・特性と、それを用いたキャラクタディスプレイ装置の概要を説明した。発明されてから十数年を経過した現在、パネルの特性改良も進み実用化の段階にあるといえる。実用化にあたっては点灯電圧を低く、メモリメリットを大きくするとともに、次第に大形化されているパネルを精度よく製作する技術が必要である。一方キャラクタディスプレイ装置においてはそれほど重要ではないが、今後プラズマパネルをより多くの表示装置に利用するためには、中間調表示・カラー化を実現しなければならない。すでにこの方面の研究開発も各所で始められているようである。

参 考 文 献

- (1) Coordinated Science Laboratory, Q. P. R., 31, University of Illinois, Sept.-Nov. (1964)
- (2) W. E. Johnson and L. J. Schmersal : A 1/4-Million-Element AC Plasma Display With Memory, SID International Symposium, May, (1971)
- (3) 大川, ほか : C 232 形 カラーキャラクタディスプレイ装置, 三菱電機技報, 45, No. 12, 1,618 (昭 46)
- (4) 倉橋, ほか : プラズマディスプレイの諸特性, 学振第 125 委, 資料 233 号
- (5) 放電ハンドブック : 電気学会放電専門委員会編, 昭 44 年版

水晶腕時計用 CMOS IC

大久保利美*・中山 光雄*・坂根 英生*
安岡 晶彦*・堀場 康孝*・鍋谷 弘*・富沢 孝*

CMOS IC for Quartz Wristwatches

Kitaitami Works Toshimi OHKUBO・Mitsuo NAKAYAMA・Hideo SAKANE
Akihiko YASUOKA・Yasutaka HORIBA・Hiroshi NABETANI・Takashi TOMISAWA

Complementary MOS (CMOS) IC has unique features of high-noise immunity, high switching speed, low operating voltage and low power consumption. Its application to the field of portable electronic equipment is now in rapid progress. The electronic circuits of the quartz wristwatch are composed of a crystal oscillator, a frequency divider and a step motor driver. These are required to operate more than one year at the voltage as low as 1.5 V of a small silver oxide battery. Silicon gate CMOS technique is the best one to realize those circuits which satisfy above demand. A new CMOS IC has been developed at Semiconductor Research Department of Kitaitami Works. In this CMOS IC, all the electronic circuits were integrated in one chip and put in a small package using Beam-Lead Bonding technique. In this paper, the electronic circuits and fabrication techniques are described.

1. ま え が き

電子式卓上計算機という市場を得て、Pチャネル MOS LSI 技術が急速に進歩したことは、衆知のとおりであるが、最近の CMOS IC (Complementary Metal Oxide Semiconductor : 相補形 MOS) 技術の進歩は、電子式腕時計の製作を可能にし、この腕時計市場を足場にして、CMOS 技術がさらに発展しようとしている。

CMOS IC は一つのチップ内に Pチャネルと Nチャネルのトランジスタが組み込まれているため、従来の Pチャネルトランジスタにくらべて、雑音余裕度が大、スイッチング速度が大、低電圧動作、低消費電力という大きな特色を持ち、現在、時計・カメラ・電卓・玩具・計測器等の携帯用機器の分野へと応用範囲を拡大しようとしている。なかでも最も市場性の大きいものとして、現在、腕時計があげられ、活発な開発が各所で進められている⁽¹⁾⁽²⁾。

水晶発振式腕時計の全電子回路の構成を図 1.1 に示すが、これは発振回路部、周波数分周部、およびモータ駆動出力回路部から構成されている。

腕時計の限られた小さなスペース内での電源として、通常、超小形酸化銀または酸化水銀電池が使われる。このため上記電子回路は、この電池の動作電圧 1.5 V 以下で動作し、電池の寿命を最低 1 年間確保するために、消費電流を 18 μ A 以下に押える必要がある。

現在までのところ、これらの要求に対しては、シリコンゲート CMOS 技術と小形化のためのビームリードボンディング技術の組合せが最適と思われる。

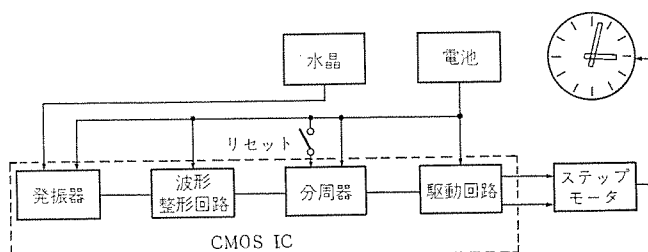


図 1.1 水晶腕時計構成
Quartz wristwatch block diagram.

ここでは水晶腕時計の全電子回路を 1 チップ内に収容し、さらに低電圧・低消費電力動作を可能にした、シリコンゲート CMOS IC の電子回路およびその製造法について述べる。

2. 電 子 回 路

2.1 発振部

発振器は原理的に図 2.1(a) のように増幅器と帰還ループとによって構成される。発振の条件は、

$$|A||\beta| > 1 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\angle A + \angle \beta = 360^\circ \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

である。ただし A は増幅器の増幅率、 β は帰還回路の伝達率である。水晶発振子を含む π 形回路網から成る帰還ループをもつ図 2.1(b) の回路は、いわゆるピアース発振回路である。

増幅器の電圧増幅率は約 30 dB である。増幅器をバイアスするためのいくつかの抵抗は、低電流回路のバイアス回路に対する一般的要求として、100 k Ω から 100 M Ω 程度の範囲の高抵抗であることが要求される。これら抵抗は、non dope または light dope の多結晶シリコン層を用いて実現されるが、かかる高抵抗を内蔵できることは、シリコンゲートプロセスの副次的利点である。

帰還ループの伝達特性を求めるため、まず水晶発振子のインピーダンス Z を、図 2.2(a) に示す水晶発振子の等価回路から求めると、

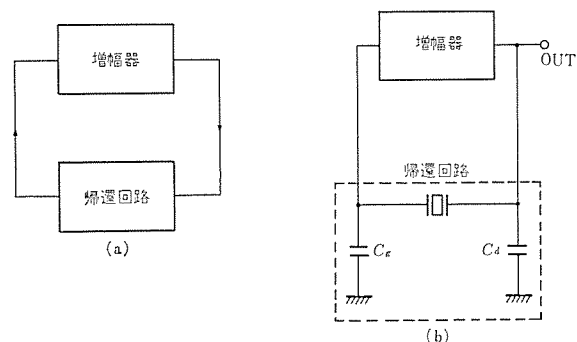


図 2.1 発振部
Oscillator.

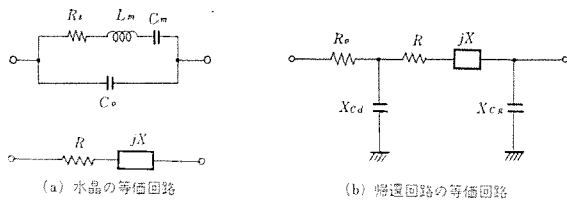


図 2.2 帰還回路
Feedback network.

表 2.1 水晶発振子の等価回路定数
Crystal parameter values.

f	16.384 kHz
R_s	30 k Ω
L	19.3 kH
C	0.0049 pF
C_0	5.1 pF

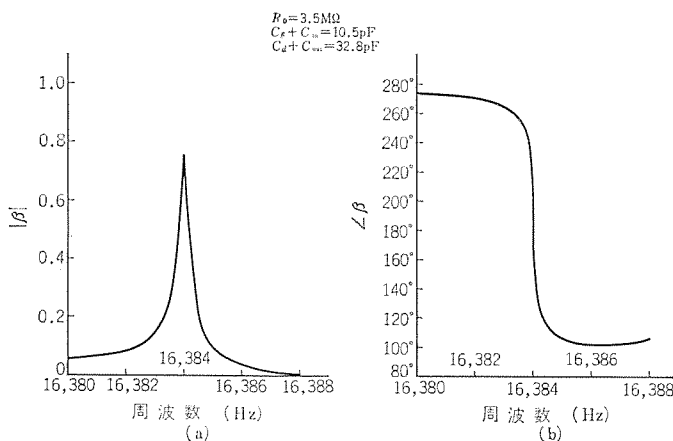


図 2.3 帰還回路の伝達特性
Transfer characteristics of feedback network.

$$Z = \frac{(1 - \omega^2 L_m C_m) + j\omega R_s C_m}{\omega^2 R_s C_m C_0 + j[\omega^3 L_m C_m C_0 - \omega(C_m + C_0)]} \quad (2.3)$$

$$\equiv R + jX \quad (2.4)$$

ここで R , X はそれぞれ Z の実数部・虚数部である。

図 2.1 (b) の帰還回路は、増幅器の入出力インピーダンスを考慮すれば、図 2.2 (b) のようになる。ここで R_o は増幅器の出力抵抗、 X_{C_s} , X_{C_d} はそれぞれ、図 2.1 (b) の C_s , C_d に増幅器の入力容量 C_{in} , 出力容量 C_{out} を加えたもののリアクタンスである。図 2.2 (b) より $|\beta|$, $\angle\beta$ を求めると

$$|\beta| = \frac{X_{C_s} X_{C_d}}{[R R_o + X_{C_d}(X - X_{C_s})]^2 + [R_o(X - X_{C_s} - X_{C_d}) - R X_{C_d}]^2}^{1/2} \quad (2.5)$$

$$\angle\beta = 180^\circ - \tan^{-1} \left[\frac{R_o(X - X_{C_s} - X_{C_d}) - R X_{C_d}}{R R_o + X_{C_d}(X - X_{C_s})} \right] \quad (2.6)$$

表 2.1 の水晶について、式 (2.5), (2.6) により、 $|\beta|$, $\angle\beta$ を計算した結果を図 2.3 (a) (b) に示す。16 kHz 程度の低周波では、 $|A| \approx 30$ dB, $\angle A \approx 180^\circ$ であるから、16.384 kHz 近傍で発振条件式 (2.1), (2.2) が満たされていることがわかる。温度・電源電圧・浮遊容量などの変化により $\angle A$ が変動しても、発振条件式 (2.2) を満たすための $\angle\beta$ の変化は、図 2.3 (b) のごとく周波数のごとくわずかな偏移ですむことになり、これが水晶発振子の周波数安定性につながっている。

16 kHz 程度の低周波水晶発振子で腕時計に用いられるものは、音叉 (叉) 形に切り出した $+5^\circ$ X カットのもので、パッケージ外形は

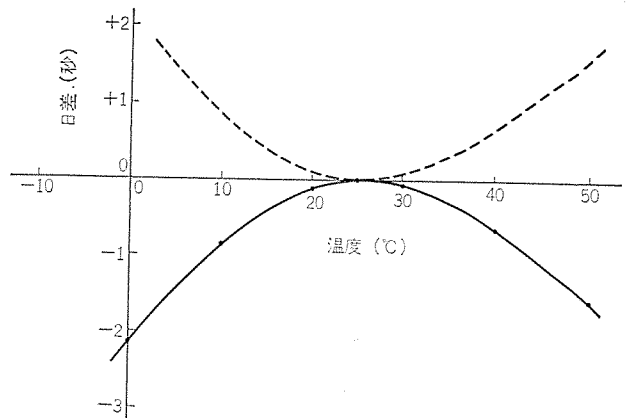


図 2.4 水晶発振子の温度特性
Oscillator frequency vs. temperature.

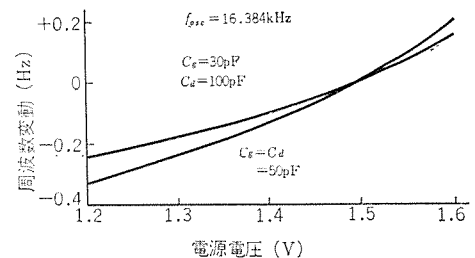


図 2.5 発振周波数の電源電圧変動
Oscillator frequency vs. supply voltage.

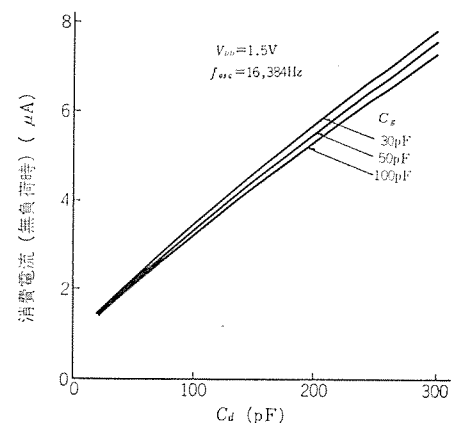


図 2.6 共振容量値と消費電流との関係
Dependence of current drain on C_g and C_d .

$4 \times 4 \times 15$ mm³ 程度の大きさである。表 2.1 はその等価回路定数の一例である。

図 2.4 は C_g , C_d として温度係数 0 のコンデンサを接続した場合の、発振周波数の温度依存性を示す実験結果である。実線で示された二次曲線は、ほぼ $+5^\circ$ X カットの水晶発振子自体の温度特性によるものである。

携帯温度範囲 5~35°C での周波数変化を補償するためには、図 2.4 の破線で示すような温度特性をコンデンサに持たせればよく、1 ppm すなわち日差にして、約 0.1 秒の誤差におさえることが可能である。また周波数の微調のためには、 C_g か C_d のどちらか一方に並列にトリマコンデンサを接続すればよい。

電源電圧依存性を図 2.5 に示す。この変化は電源電圧による $\angle A$ あるいは入出力インピーダンスの変化として説明されるが、腕時計に用いられる酸化銀電池・酸化水銀電池の放電特性は、放電終了の直前まできわめて平坦であるため、電圧変化による周波数変動は考えなくてもよい。

発振器の消費電流 I_{osc} は、発振周波数を f として、

$$I_{osc} \approx f C_d V_{DD} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

で決定される。これは発振器用増幅器の出力抵抗が、16 kHz での C_d のインピーダンスに比べて低いため、 C_d が共振容量としてよりもむしろ負荷容量として働くためである。これに対し C_g はほとんど共振容量としてのみ働くので、消費電流にはほとんど影響しない。発振器電流の C_g , C_d 依存性を図 2. 6 に示す。

発振器出力は、バッファと波形整形の目的で 2 段のインバータを介してから周波数分周部に接続される。

2. 2 分周部

1/2 分周回路は、図 2. 7 に示すようにリセット機能を持ったマスタスレーブ形フリップフロップである。図の下半分がマスタ部分で“記憶部”，上半分がスレーブ部分で“出力転送部”と考えることができる。 Q_{n-1} , \overline{Q}_{n-1} を入力とすれば、 Q_n , \overline{Q}_n は 1/2 に分周された出力であり、これを次段への入力として分周器の縦続接続をうることができる。本 IC の分周部は、15 段の 1/2 分周器で構成されている。

Q_{n-1} の周波数を f_n (Hz) とすると、図 2. 7 の入力 Q_{n-1} , \overline{Q}_{n-1} は周波数 f_n でレベル変化するが、その他のゲートおよびトランジスタのドレイン(ソース)の結合部は、すべて周波数 $f_n/2$ でレベル変化する。これを考慮して 1 段当たりの電流 I_n を求めれば、

$$I_n = V_{DD} [f_n \sum_i C_{G_i} + (f_n/2) \sum_j C_{G_j} + (f_n/2) \sum_k C_{D_k}] \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ただし

C_{G_i} , C_{G_j} : ゲート容量

C_{D_k} : ドレイン(ソース)の拡散接合容量

\sum_i : 周波数 f_n で動作するゲートについての和

\sum_j : 周波数 $f_n/2$ で動作するゲートについての和

\sum_k : 周波数 $f_n/2$ で動作する拡散接合についての和

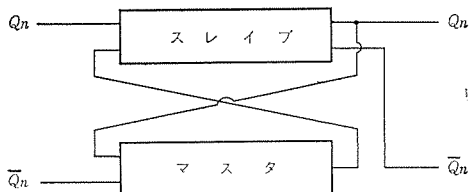


図 2. 7 1/2 分周回路 Binary cell.

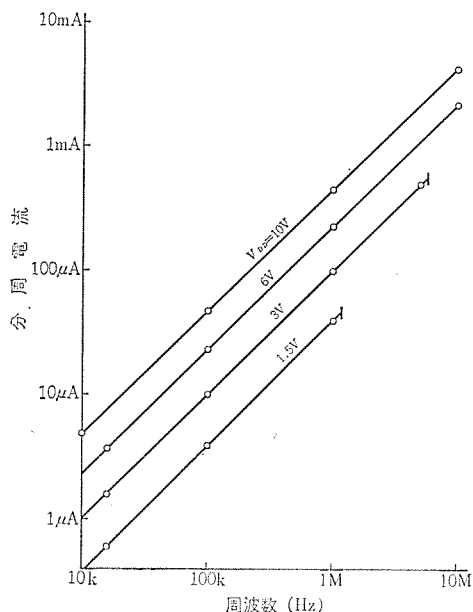


図 2. 8 分周電流の周波数特性
Frequency dependence of divider current.

またゲート容量 C_G はミラー効果を考慮して、

$$C_G = C_I + \left(\frac{1+G_V}{2} \right) C_{CH} + (1+G_V) C_{OV} + C_{OV} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

ただし

C_I : アルミ配線容量

C_{CH} : 対チャネル容量

C_{OV} : ゲートオーバーラップ容量

G_V : 電圧増幅率

$f_n=16$ kHz では、式 (2. 8), (2. 9) にしたがって計算すると、 $I_n=0.63 \mu A$ となる。縦属接続した分周器の全消費電流 I_{DIV} は、

$$I_{DIV} = I_n + (I_n/2) + (I_n/4) + \dots\dots\dots \approx 2I_n \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

であるから、16 kHz で $1.26 \mu A$ となる。

図 2. 8 に実験結果を示す。電力/周波数は、電源電圧 1.5 V で 1 段当たり 30 nW/kHz である。

2. 3 駆動部

駆動部の機能は、電圧-電流の変換である。ステップモータに供給すべき反転電流を、低電源電圧で効率良く供給するため、図 2. 9 のブリッジ形出力回路が採用されている。ステップモータを 1 秒ごとに間欠的に動かすため、ブリッジ形出力回路に対する周期 1 秒の入力パルスは、入力的一方を他方に対して、1/64 秒遅らせる回路を通して加える。結果として、両入力パルスの位相のずれた期間に対応する 1/64 秒幅の反転電流パルスを、1 秒ごとにステップモータへ供給することができる。平均電流としては数 μA である。

ピーク値数 100 μA の電流を、小さな残留電圧で流すためには、CMOS トランジスタとしては相当に大きなサイズのトランジスタが要求される。P, N 両トランジスタの残留電圧の和が、ある値以下であるためのトランジスタの設計は、両トランジスタの面積和が最小になるように設計される。一例として 3 k Ω 負荷の場合に、残留電圧が 0.2 V 以

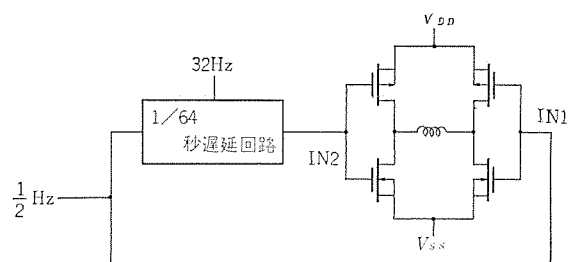


図 2. 9 駆動部
Driver circuit.

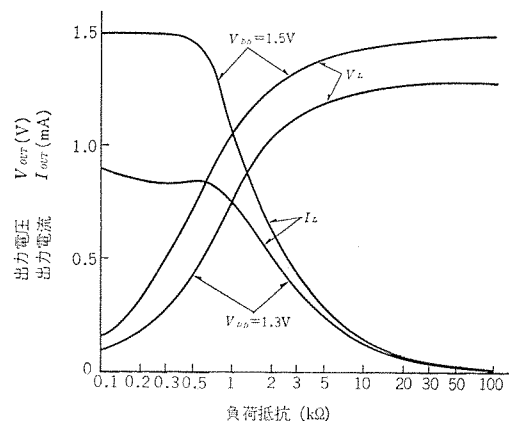


図 2. 10 出力特性
Output characteristics.

下であるためのゲート幅は、worst case 設計では、P、N 両トランジスタの和として約 5 mm、ブリッジ形出力回路全体では約 10 mm のゲート幅となる。

出力特性を図 2. 10 に示す。

2. 4 リセット機能

この IC の特長の一つはリセット機能を持っていることであって、リセット解除後 1 秒後に駆動パルスを出し秒針を 1 秒送ることによって、時報に対する時刻合わせが簡単にできる。リユーズを単極単投スイッチとして簡単化できるよう、リセット入力は、常時はリセット入力端子と V_{SS} との間に接続された多結晶シリコン層から成る高抵抗で、電位的に V_{SS} に固定されている。リセット入力を V_{DD} に接続すればリセットがかかるが、このときの電流は、多結晶シリコンが 10 MΩ 以上の高抵抗であるためきわめて少ない。

2. 5 発振周波数の選択について

水晶発振子の小形化・低価格化のためには、発振周波数は高いほうがよい。発振周波数を 0.8 MHz 以上にすれば、AT カットの水晶を用いることができ、この水晶では周波数の温度特性が、常温付近でほぼ温度係数が 0 となる三次曲線となるため、周波数安定性が飛躍的に向上し、図 2. 4 のような共振容量による温度補償が不要になって、時計組立時の水晶とコンデンサとの組合せの問題が解決される。

しかし発振周波数を上げると、式(2.8)、図 2. 8 のように電流が増大するので、発振周波数の上限は電池を 1 年間以上動作させるための電流によって制限される。電流容量 165 mAH の小形酸化銀電池の 1 年間使用を前提とすれば、全システムの電流を 18.8 μA 以下におさえる必要があり、表 2. 2 のように本 IC の発振周波数の上限は 65.536 kHz となる。

応用回路の工夫により、発振・分周を含めて 1 MHz で 30 μA におさえることは、現在の技術レベルでも可能であるが、動作周波数 2 MHz 以上で、電流が 18.8 μA 以下のシステム実現のためには、新

表 2. 2 発振周波数と各ブロックの電流
Current consumption vs. frequency.

周波数	発振部	分周部	駆動部	全電流
16.384 kHz	2.2	(15 段) 0.8 μA	6.7 μA	9.7 μA
32.768 kHz	4.1	(16 段) 1.6 μA	6.7 μA	12.4 μA
65.536 kHz	8.2	(17 段) 3.2 μA	6.7 μA	18.1 μA

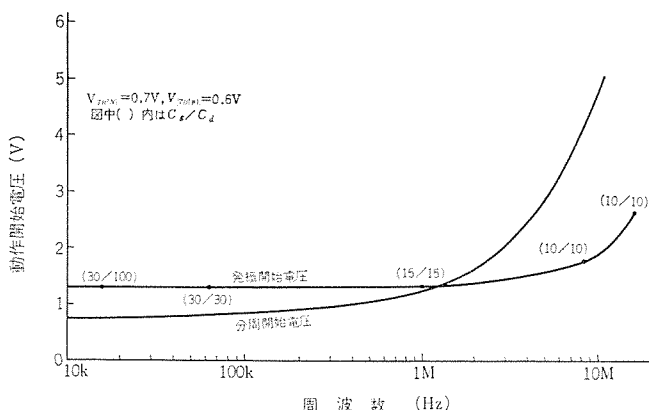


図 2. 11 周波数に対する発振開始電圧と分周開始電圧
Oscillator Start voltage and divider start voltage vs. frequency.

しい発振・分周回路の研究と、IC 製造上では、諸容量の低下としきい電圧の低下が必要である。

2. 6 動作開始電圧としきい電圧

分周器ではトランジスタの容量性負荷が小さいので、しきい値電圧の絶対値の和が電源電圧より大きくなって、P、N 両トランジスタ共 OFF の瞬間が生じても動作可能である。しかし高周波では、トランジスタの増幅率の低下と位相の遅れが大きくなるため、より高い電源電圧と結果としての電流の増大が必要になる。試作 IC の周波数による分周開始電圧の変化を図 2. 11 に示す。同図中に発振開始電圧も示されているが、低周波と高周波では、発振・分周の間で動作開始電圧が逆転していることに注意を要する。

3. CMOS IC 製造法

前述のごとく腕時計用 CMOS IC の特長は、低電圧動作・低消費電力という点にある。この特長は、まず同一シリコン基板の一部に基板と逆伝導形のアイランド領域を作り、さらにこの上に低いしきい値電圧の P または N チャネル MOS トランジスタを作って、それぞれを相補形に組合せることによって生じたものである。

CMOS IC 製造上の問題点も、このアイランド領域の形成と同チャネルトランジスタのしきい値電圧を 1 V 以下に制御する技術に関連して発生してくる。この点を中心としたシリコンゲート CMOS のウエハ製造プロセス、および IC 組立の際のビームリードボンディング技術について以下に述べる。

3. 1 シリコンゲート CMOS IC の製造工程

図 3. 1 にシリコンゲート CMOS IC 製造工程の概略を示す。

- (1) N 形ウエハの一部に P 形アイランドを形成後、酸化膜を全面除去する。(図 3. 1(a))
- (2) ゲート酸化膜・窒化膜・多結晶シリコン膜の成長を行なう。(図 3. 1(b))
- (3) 多結晶シリコンのフォトリソを行ない、必要な部分に多結晶シリコンを残す。(図 3. 1(c))
- (4) 低温酸化膜を形成後、P チャネル領域のフォトリソを行ない、ボロン拡散を行なう。(図 3. 1(d))
- (5) 低温酸化膜を形成後、N チャネル領域のフォトリソを行ない、リン拡散を行なう。(図 3. 1(e))
- (6) さらに低温酸化膜を形成後、コンタクトホールをフォトリソを行ない、アルミニウム配線を行なう。(図 3. 1(f))

以上がシリコンゲート CMOS IC ウエハ製造工程の概略である。

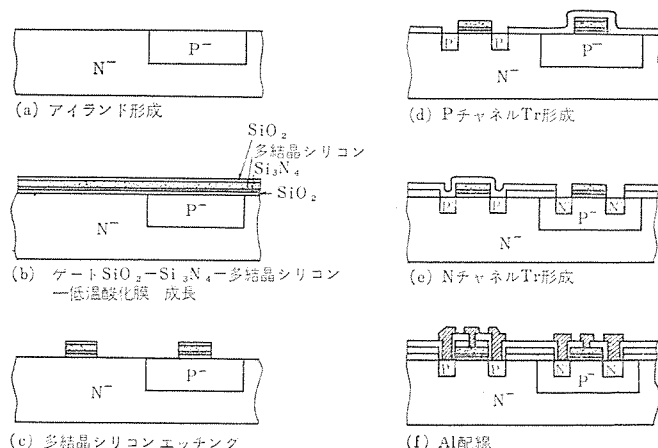


図 3. 1 シリコンゲート CMOS IC 製造工程の概略
Silicon gate CMOS IC fabrication process.

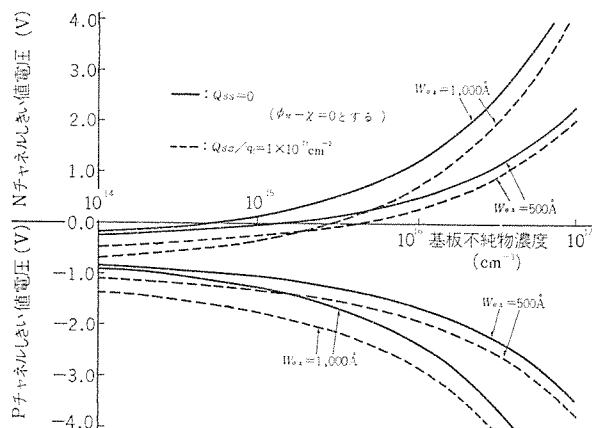


図 3.2 しきい値電圧の基板不純物濃度依存性
Impurity concentration dependency of threshold voltage.

3.2 アイランド形成法

われわれはアイランド領域の形成方法として選択エピタキシャル法と、ボロンの低濃度拡散法の二つを検討した。

MOSトランジスタのしきい値電圧 V_{TH} は近似的に

$$V_{TH} = \phi_{MS} \mp 2\phi_F - \frac{Q_{SS}}{C_{OX}} \mp \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{4\epsilon_0\epsilon_{Si}|\phi_F q|N_I} \dots\dots\dots (3.1)$$

で表わされる。複号一は、Pチャネル、+はNチャネルトランジスタに対応する。 ϕ_{MS} はゲート電極と基板シリコンの仕事関数差、 ϕ_F は真性フェルミレベルから測ったフェルミレベル、 C_{OX} はゲート酸化膜容量、 Q_{SS} は界面電荷、 $\epsilon_0\epsilon_{Si}$ は基板シリコンの誘電率、 q は電子電荷、 N_I は基板シリコンの不純物濃度である。

図 3.2 は式 (3.1) の V_{TH} と N_I の関係を、 Q_{SS} およびゲート酸化膜厚 W_{OX} をパラメータとしてプロットしたものである。この図ではゲート電極の仕事関数 ϕ_M をシリコンの電子親和力 χ に等しいとしている。この図からわかるように、アイランド領域に形成されるNチャネルトランジスタの V_{TH} を 1V 以下にするには、 W_{OX} を 1,000 Å 前後にした場合でも、 N_I を $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下にしなければならない。選択エピタキシャル法を用いると、表面不純物濃度を $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下に制御することは比較的容易である。この方法はまず基板の全面酸化後、アイランド領域を形成すべき部分の酸化膜を除去する。次に残留酸化膜をマスクにしてアイランド領域の基板を 10μ 程度エッチオフした後で、その部分にP形層をエピタキシャル成長させる。しかしこの選択エピタキシャル法では次のような問題が生じる。

- (1) マスクとして用いた酸化膜上に多結晶シリコンが付着し、その除去が容易でない。
- (2) アイランド領域の穴をエピタキシャル層で埋めたとき、基板面とエピタキシャル層面を完全に一致させることがむずかしいうえに、アイランドエッジにおいてエピタキシャル層が盛り上がる傾向にある。特にこの傾向はアイランドのコーナ部で著しい。

これらの困難を解決するためにはエピタキシャル層成長後、ウエハ表面を鏡面研磨する等の方法をとればよいが、かなりの精度を要求されるので量産的には好ましくない。

一方、ボロン低濃度拡散法では上記のような困難は生じないが、この場合は表面不純物濃度の制御がむずかしい。表面不純物濃度を低くする方法として、デポジション温度を低くする方法、ドライブ工程で酸化膜を成長させボロンを吸い出す方法、ドーパドオキไซด์を用いる方法およびイオン注入法等があるが、われわれは前二者の併用を試みた。すなわちボロンのデポジション温度をできるだけ低くし、かつドライブ工

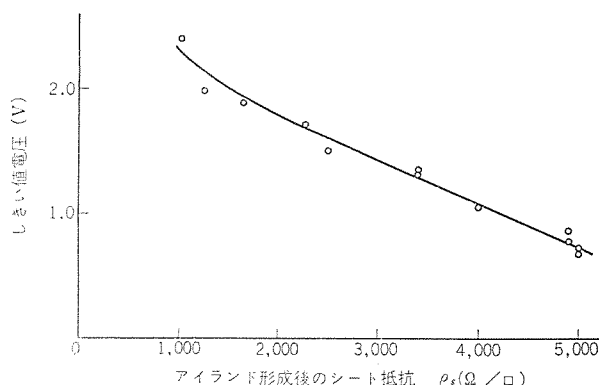


図 3.3 アイランドシート抵抗と N チャネル MOS Tr のしきい値電圧の関係
Relation between threshold voltage and sheet resistivity of Island region.

程でボロンの吸い出しを行ない、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下の表面不純物濃度を実現する方法である。

図 3.3 に上記のような方法で形成したアイランド領域のシート抵抗値と、そのアイランド領域上に作ったNチャネルトランジスタのしきい値電圧 V_{TH} との関係の一例を示す。

3.3 しきい値電圧 V_{TH} の低減

腕時計用 CMOS IC は 1.5 V 以下の電圧で動作することが要求されるため、PチャネルおよびNチャネルMOSトランジスタの $|V_{TH}|$ をおのおの 0.5~0.7 V 程度に制御しなければならない。 V_{TH} の理論式を示す式 (3.1) および図 3.2 からわかるように、両チャネルMOSトランジスタの V_{TH} を上記の範囲に入れるには、界面電荷 Q_{SS} 、ゲート酸化膜厚 W_{OX} 、基板不純物濃度 N_I 、ゲート物質の仕事関数 ϕ_M の適当な組合せを選ぶ必要がある。 W_{OX} はいずれのトランジスタに対しても小さいほうがよいが、破壊耐量を考えるとあまり小さくできない。

3.3.1 Q_{SS} の低減

PチャネルMOSトランジスタに対しては、 Q_{SS} を小さくする必要がある。これは <100>シリコン基板の使用、ゲート酸化膜のアニール、製造工程の清浄化等によりある程度行なえる。さらに小さくする方法としてはゲート絶縁膜に Al_2O_3 を用いる方法がある。 Al_2O_3 は比誘電率が大きくシリコン基板をP形化する性質をもつため、フラットバンド電圧 V_{FB} を大幅に低減することが可能であり、また Na^+ 等の金属イオンに対しても阻止能力をもつ。 Al_2O_3 膜の形成にはスパッタリング・陽極酸化・蒸着・気相成長等の方法があるが、量産性、ソース化合物の取扱いの容易さ、 Al_2O_3 膜の特性から AlCl_3 による気相成長が最適である。850°C における $\text{AlCl}_3\text{-H}_2\text{-CO}_2$ 系で成長した Al_2O_3 は $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ で、屈折率 1.85、比誘電率 8.8 の耐酸性を有する透明膜である。N形シリコン基板を用いた MAOS 構造の V_{FB} は、図 3.4 に示すように酸化膜厚・ Al_2O_3 膜厚を変えることにより制御可能である。また V_{FB} の Al_2O_3 膜厚依存性は、 Al_2O_3 成長温度もしくはアニール温度により変えることができる。ただし CMOS IC に適用する場合には、Nチャネルトランジスタの V_{TH} も考慮して適当な条件を選ばねばならない。

3.3.2 ゲート物質の仕事関数 ϕ_M

ϕ_M は Pチャネルに対しては大きく、Nチャネルに対しては小さくする必要がある。このための有効な方法としてシリコンゲート方式がある。これはゲート電極として多結晶シリコン膜を用いる方法であるが、この多結晶シリコンにボロンをドーピングすると、アルミニウム電極の場合よ

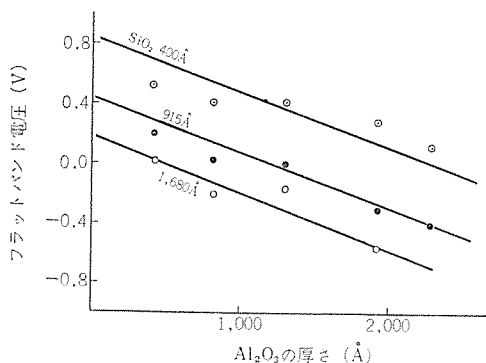


図 3.4 MAOS 構造における V_{FB} 制御
Flat band voltage control of MAOS structures.

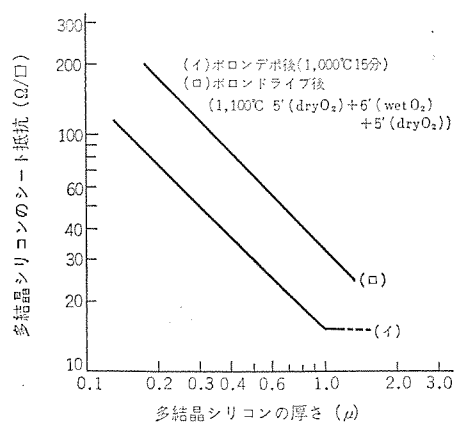


図 3.5 ボロン拡散した多結晶シリコンのシート抵抗
Sheet resistivity of boron diffused polycrystalline silicon.

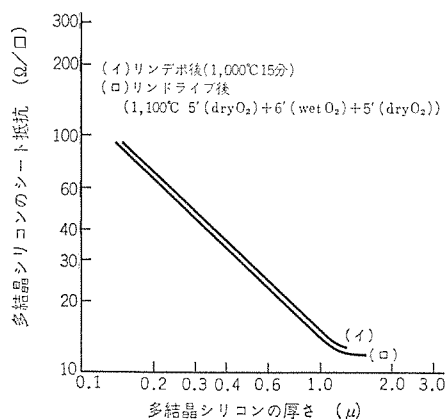


図 3.6 リン拡散した多結晶シリコンのシート抵抗
Sheet resistivity of phosphorous diffused polycrystalline silicon.

り ϕ_M が約 1V ほど大きくなる。なおリンをドーパした場合には、アルミニウム電極の ϕ_M の値とほとんど同じである。

したがって Pチャネルのゲートに用いる多結晶シリコンにはボロン拡散、Nチャネルのそれにはリン拡散を行なうことにより、アルミニウム電極の場合と比較して、 $|V_{TH(P)}| + V_{TH(N)}$ を約 1V 小さくできることになる。

多結晶シリコンをゲート電極として用いた場合、その電気的特性とくに電気伝導度がトランジスタ特性に影響を与えるおそれがあるので、電気伝導度をできるだけ大きくする必要がある。多結晶シリコンの電気伝導度は、その成長条件、拡散条件および拡散後の熱処理条件等により大きく左右される。

図 3.5 および図 3.6 に、ボロン拡散およびリン拡散後の多結晶シリコンのシート抵抗値を示す。ボロン拡散した多結晶シリコンのシート抵

抗値は、酸化雰囲気中でのドライブによりかなり大きな値となる。

3.3.3 基板不純物濃度 N_I

基板不純物濃度 N_I は両チャネル共できるだけ小さいほうがよい。特に Nチャネルトランジスタの V_{TH} の低減は、アイランド表面不純物濃度の制御にかかっていると見てよい。これは Q_{ss} 等を考慮に入れて決めなければならないが、少なくとも $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下には制御する必要がある。

3.4 パッケージング

腕時計の限られたスペース内に、この IC を収容するためには、使用するパッケージをできるだけ小形に仕上げる必要がある。

通常のワイヤボンディングを用いたパッケージングでは、ボンディングに要する面積が大きく、またワイヤのたるみによりパッケージの厚さも増すため、上記要求を満たすことは困難となっている。

これに対してビームリードボンディングを用いると上記の欠点は改良される。なおビームリードボンディング法は放熱性に難点があるが、腕時計の場合は、前述のとおり消費電力の少ない CMOS IC のため問題にはならない。

従来のビームリードボンディング法は図 3.7 に示すように、チップ裏面を上にして置かれ、Au ビームは基板上の Au 配線に熱圧着でボンディングされる。(Face down method)

ところが、この方法ではチップの位置合わせの困難さという技術上の問題がある。われわれはこの点を改良するためチップ表面を上にしてボンディングする方法を用いている。(Face up method)

この方法は図 3.8 に示すように、チップが入るおう(凹)部と Sn めっき配線を持つセラミックパッケージにチップ表面を上にしてはめこむ方法である。ボンディングは、Sn 配線を加熱熔融してチップの Au ビームと結合させることによって行なわれる(図 3.9)。この方法によりチップの位置合わせは大変容易になった。パッケージの寸法はフタ付け

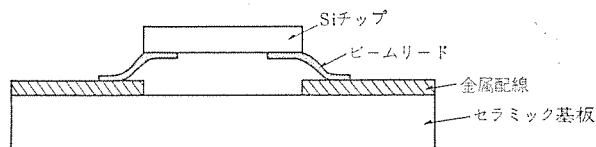


図 3.7 通常のビームリードボンディング法
Usual Beam-Lead Bonding method (Face down).

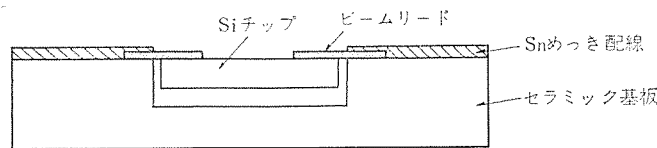


図 3.8 新ビームリードボンディング法
New Beam-Lead Bonding method (Face up).

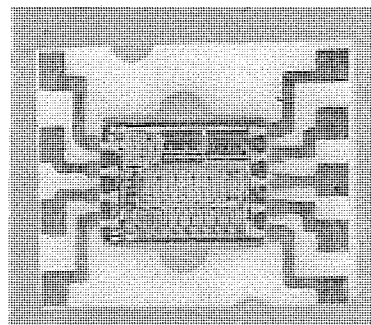


図 3.9 新ビームリードボンディング法を用いた腕時計用 IC
IC for wristwatch using new Beam-Lead Bonding method.

後で $6 \times 5 \times 1.5 \text{ mm}^3$ であり、同チップにワイヤボンディング法を適用した場合と、ビームリード法を適用した場合のパッケージの体積比は 2.5:1 と大幅に小さくなった。なおいっそうの小形化も可能である。チップのボンディング後、チップ表面およびチップとパッケージ間のすきまには樹脂が充てん(填)され、全体が十分な機械的強度および化学的安定性を持つように作られる。

4. む す び

16 kHz 水晶発振、小形ステップモータ駆動に適した、腕時計用シリコンゲート CMOS IC の特性・製造法につき、その特長および問題点を報告した。

時計は、現在のところシリコンゲート CMOS の特色が最大に発揮される分野である。

なお、水晶腕時計の今後の動向としては、原発振周波数の上昇による精度の向上、水晶価格の引き下げ等があげられる。しかし、周波数の上昇は、IC にとって消費電力の増加と高集積化によるコストアップにつながる。この結果、高周波における高効率発振回路、新しい回路構成による低損失分周回路等の回路研究、および高集積化と V_{TH} 安定化のためのプラノックス、イオンインプランテーション等の新製造法の導入が当面の課題となっている。腕時計の新しいもう一つの動向は表示のデジタル化である。これも低電力消費が要請されるため、CMOS IC の領域であるが、連続に出てくる時刻信号を、数字表示

装置用の不連続な表示信号に変換するデコーダ回路の IC が、寸法でみるかぎりでも大きな役割を示すことになる。

発光ダイオード、または液晶による固体数字表示装置を使った腕時計が、すでに発表されているが、まだ明確な評価を下すに至っておらず、しかも互いに相反した特色を持つので、数字表示装置自体と、これに関連したプログラム式デコーダ用 IC の開発を含め、現段階では残された問題がいまだ多い。

試作した IC は基本的な計時機構のほかに、リセット機構を具備していることが大きな特長であるが、今後時計用 IC は多機能性をいっそう要求され、集積度の高い LSI へと進み、時計の機械的な要素の大幅な減少がみられると同時に、機械時計で達せられなかった各種付加機能の出現が期待される。

腕時計は、システムそのものがほとんど完成されたものであり、技術的な将来動向も比較的明確であるため、IC 開発の方向も容易といえるが、一方では、シリコンゲート CMOS 技術を必要としたように、製造技術および構成回路に独創的な研究を盛り込まね限り、飛躍の望めないシステムといえる。
(昭和 47-7-31 受付)

参 考 文 献

- (1) G. M. Walker : Electronics, p. 97 (April, 12, 1971)
- (2) F. Leuenberger, E. Vittoz : Proc. IEEE, 54, p. 1985, (Dec., 1966)

ZnO 薄膜超音波トランスジューサの試作

戸村 光一*・大西 勝*・吉沢 達夫*

Trial Production of ZnO Thin Film Ultrasonic Transducers by a New Method of Film Formation

Central Research Laboratory Kouichi TOMURA・Masaru OHNISHI・Michio YOSHIZAWA

It has been discovered that a thin film of ZnO can be formed by a simple method of oxidizing treatment on a vacuum-deposited thin film of ZnSe. Then a basic study has been made to know if the ZnO film thus formed can be utilized for the ultrasonic transducer. As a result it has been made known that by doping Al and Li to the material as impurities for the purpose of improving the degree of orientation of C axis, a piezo electric constant and resistivity of ZnO thin film, and by giving proper consideration to heat treatment condition, fairly good piezo electric characteristics are observed to indicate the practicability of using the film for the ultrasonic transducer. This article reports on the results of studies thus made.

1. ま え が き

薄膜超音波トランスジューサに用いられる材料に要求される特性は高抵抗であり、誘電率が小さく、大きな電気機械結合係数をもっていること等である。従来から、薄膜超音波トランスジューサ用の材料として、CdS⁽²⁾、CdSe、ZnO⁽¹⁾⁽²⁾、AlN⁽⁴⁾の蒸着膜、スパッタリング膜等が検討されてきたが、これらの材料の中で、ZnO薄膜は最も重要な材料の一つであるといえる。従来、ZnO薄膜の製法として、酸素ふんい気中での2極あるいは、3極のZnOの高周波スパッタリング法⁽²⁾⁽³⁾、ZnOの直接蒸着法⁽⁴⁾、Vaper-transport法⁽⁵⁾さらにはZnOの直接スパッタリング法⁽⁷⁾などが提案されている。われわれは超音波トランスジューサ用のZnO薄膜の製法として、新しくわれわれが発見したZnSe蒸着膜を酸化して作る方法⁽¹⁾を用いた。

ZnO薄膜超音波トランスジューサを作るに当たって、ZnO薄膜のC軸の傾き具合により縦波、横波およびそれらの両方が混じた波が厚み振動で発生する。ZnOはウルツ鉱形の結晶構造をとるため、C軸と平行に電界を加えることにより縦波のみが、またC軸と垂直に電界を加えることにより横波のみが励振できる。また、結晶の異方性を利用して、C軸が基板と約39°傾けた場合にも横波のみを発生させることもできる。

一般にZnOの蒸着膜のC軸は基板と垂直に成長しやすい性質をもつことから、縦波用の超音波トランスジューサが作りやすい。われわれの場合もZnSe蒸着膜のC軸が基板に垂直に成長しやすく、このような膜を酸化して作ったZnO薄膜のC軸は基板に対して、垂直に成長しやすい性質をもつ。一般に、これらのトランスジューサは、マイクロウェーブ発生器や、マイクロウェーブ超音波遅延線および光偏向用等に用いられるが、今回は主に遅延線用として応用する立場から各種の測定をした。この場合には特に変換器のそう入損失が最小であることが要求される。

ZnO薄膜超音波トランスジューサに関しては、すでに2, 3の人達によって、周波数範囲が0.6~1.8 GHz⁽²⁾で、数dBという低損失の超音波トランスジューサの報告があるが、われわれが試作したものでは、音波の伝ば(播)体として溶融石英を用いたため低周波側でのみ動作し、その変換損失の最小値は25dBという縦波用変換器ができた。

2. 実 験

2.1 素子の構造

われわれが試作した薄膜超音波トランスジューサをもった遅延線の構造をモデル化して図2.1に示した。遅延線の材料として理想的なものは、高周波での伝ば損失の少ないサファイアが有用であるが、われわれは、実験しやすい溶融石英を用いた。これは、われわれの提案しているような作り方でできるZnO薄膜の圧電動作特性を確認することが主目的であったためである。溶融石英の工作精度は面内 $\frac{1}{10}$ λ、裏面との平行度、1分以内になるようにした。溶融石英上につけたベース電極として、高温処理に対して比較的安定なNESA膜(1~2μ)を用いた。また、上部電極として0.5μ厚で3φの大きさのAlをZnO薄膜上に真空蒸着で形成した。

ZnO薄膜の形成は、まず初めに 5×10^{-6} mmHg程度の真空中で、不純物としてAlやLiを1mol%含んだZnSe粉末を、クヌードセン形の蒸発ルツボから蒸発させ、NESAコートした溶融石英上にZnSe膜を形成した。このとき基板温度は300°Cに保持してある。その後、このZnSe蒸着膜を500~600°Cの酸化性ふんい気炉中で0.5~2時間加熱処理することにより、ZnO膜に変換する。変換後できたZnO薄膜の膜厚は、干渉および表面荒さ計を用いて測定した結果、約3μ程度であった。

2.2 ZnO膜の形成

ZnO薄膜はZnSe蒸着膜を酸化性ふんい気中で400~600°Cの加熱処理をすることによりできる。このときの反応式は次のように書ける。

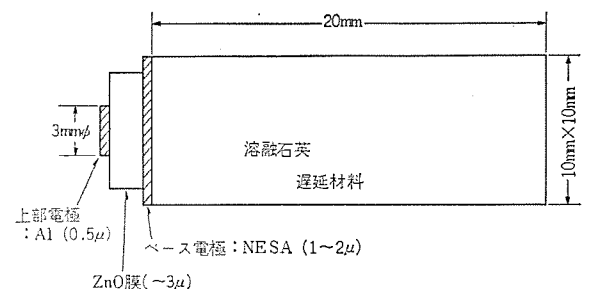


図 2.1 ZnO 薄膜超音波トランスジューサ層をつけた遅延線の断面構造

Cross section of delay line with ultrasonic piezoelectric transducer.

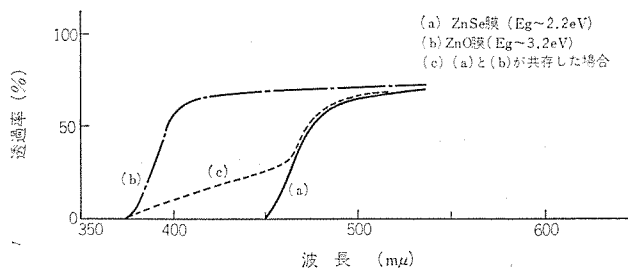
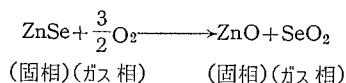


図 2.2 ZnSe 膜および ZnO 膜の光透過率特性
Transmission characteristics of ZnSe film and ZnO film.



SeO₂ は 317°C で昇華するため、400~600°C の反応炉中ではガス状態となり膜の外に飛び出し、残った膜は ZnO のみで形成される。この反応中、酸性雰囲気の中に含まれる水分の影響についても別途検討したが、ZnO 膜の形成に対して特に顕著な影響を検出することができなかった。

ZnSe 膜が完全に ZnO 膜に変換できたかどうかの簡単な検討法は、光の波長透過特性を調べればよい。すなわち図 2.2 に示すように、もし膜が完全に ZnSe 膜であれば、450 mμ の吸収端をもった光透過特性(曲線-a)を示し、また膜が完全に ZnO でできていれば、380 mμ の吸収端をもった光透過特性(曲線-b)を示す。そして膜が ZnSe と ZnO の両方の成分をもった状態であれば、両者の吸収端で立上りをもつ光透過特性(曲線-c)を示す。

また他の検討法として、X 線回折法がある。すなわち、ZnSe 結晶は一般に立方晶形の結晶構造をとり、2θ が 27.3° の所に(111)面からの回折線が、また 45.4° の所に(220)面からの回折線が、53.6° の所に(311)面からの回折線が観測できる。この中で ZnSe 蒸着膜に関しては、(111)面からの回折線が強く観測され、他の面からの回折線強度は弱い。一方、ZnO 結晶は一般に六方晶形の結晶構造をもち、2θ が 31.9° の所に(10 $\bar{1}$ 0)面からの回折線が、また 34.7° の所に(0002)面からの回折線が 36.4° の所に(10 $\bar{1}$ 1)面からの回折線が観測される。他にもいくつかの回折線がみられるが、ZnO 蒸着膜に関しては、以上の 3 本の回折線が特長である。

2.3 ZnSe と ZnO の C 軸の対応

ZnSe 膜と ZnO 膜の C 軸の対応を求めるために、特定方向の ZnSe 単結晶を切り出し、その表面を 2.2 節で述べた方法で ZnO に変換し、できた ZnO 膜の結晶軸方向を求めた。前にも述べたが、ZnSe は立方晶の結晶構造をもつことから、その C 軸は(111)軸方向と規定されるが、ZnO では六方晶の結晶構造をもち、その C 軸は(0002)軸方向と規定される。

いま(111)面を出た ZnSe 単結晶の表面を ZnO に変換し、その面方向を求めてみると、図 2.3 に示すような X 線回折結果を得た。この図からわかるように、ZnO の(0002)面が強く観測されることから、ZnO 膜は(0002)面が表面に出ていると考えられる。次に、(110)面を出た ZnSe 単結晶の表面を ZnO に変換した場合には、図 2.4 に示すような X 線回折結果を得た。この図からわかるように、ZnO の(11 $\bar{2}$ 0)面が表面に出ていると考えられる。

以上の関係をモデル的に書いてみると図 2.5 のようになり、図 2.5 (a)では ZnSe の(111)面上に、ZnO の(0002)面が形成される様子を示し、図 2.5 (b)には、ZnSe の(110)面に ZnO の(11 $\bar{2}$ 0)面

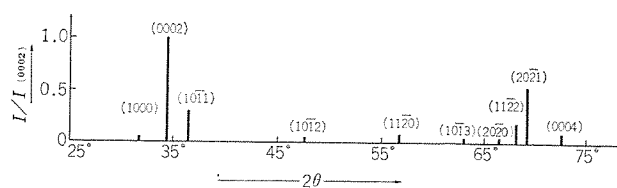


図 2.3 (111)面をもった ZnSe 単結晶の表面を ZnO に変換した時の ZnO の X 線回折図形
X-ray diffraction pattern of ZnO film oxidized the ZnSe crystal surface of the (111) face.

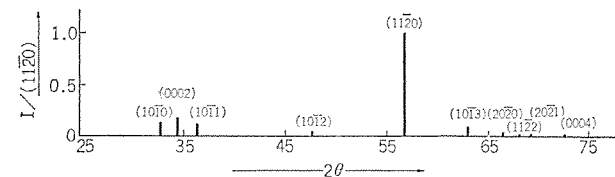


図 2.4 (110)面をもった ZnSe 単結晶表面を ZnO に変換した時の ZnO の X 線回折図形
X-ray diffraction pattern of ZnO film oxidized the ZnSe crystal surface of the (110) face.

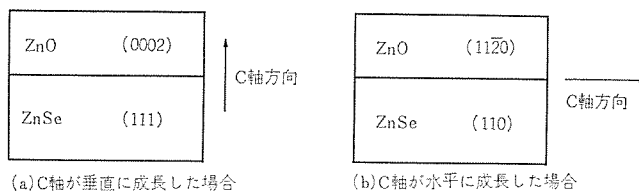


図 2.5 モデル化した ZnSe 上の ZnO の C 軸の成長の様子
Modelized growth direction of C-axis of ZnO film on the ZnSe crystal.

が形成されることを示した。すなわち、これらの関係は、ZnO の C 軸が ZnSe の結晶方向に強く支配されることを物語っている。そしてこの関係は、ただ単結晶に限らず蒸着膜についてもいえる。

2.4 C 軸配向性に対する基板の影響

ここではおもに不純物を添加していない ZnSe 膜および ZnO 膜について述べ、不純物の効果については次節に述べる。

初めに、無定形ガラス基板(パイレックスガラス板および熔融石英板)上に ZnO 膜を形成させる場合について述べる。この種の基板上に形成した ZnSe 膜の C 軸は、きわめて強く基板と垂直に成長していることが X 線回折の結果から確かめられた。すなわち(111)面からの回折線のみが観測でき、他の面からの回折線がほとんどない。

このような ZnSe 膜を 2.2 節に従って酸化処理した。酸化処理温度を 500°C および 600°C の場合について検討した結果の一例を表 2.1(A)に示した。表に示すように酸化処理温度が 500°C の場合に比べ、600°C になるとできた ZnO 膜の(0002)面からの回折線の強度が増し、(10 $\bar{1}$ 0)面や(10 $\bar{1}$ 1)面からの回折線強度が減少することがわかる。すなわち、これは酸化処理温度が高くなるほど C 軸配向性が良くなり、ZnO 膜の C 軸が基板と垂直に成長する割合も強くなることを意味している。

これに対して NESA 電極をつけた無定形ガラス基板を用いた場合には、できた ZnSe 膜の C 軸配向性は、前の場合と比較してわずかに悪くなる傾向がある。そして、この ZnSe 膜を酸化処理してできた ZnO 膜の C 軸は基板と垂直に成長しているといえなくなる。すなわち、X 線回折の結果、ZnO 膜の(0002)面からの回折線強度に対して、(0002)面以外の(10 $\bar{1}$ 0)面や(10 $\bar{1}$ 1)面からの回折線強度が増加し、(0002)面からのそれと等しいくらいの回折強度をもつようになる。この傾向は、酸化処理温度を 500°C から 600°C にする程度

表 2.1 酸化処理温度による ZnO 膜の C 軸配向性の様子
Degree of the C-axis orientation of ZnO film
dependence of oxidizing temperature.

(A) ガラス基板使用 (B) NESA コートガラス板 使用		X 線回折強度(Relative)			
		(10 $\bar{1}$ 0)	(0002)	(10 $\bar{1}$ 1)	(10 $\bar{1}$ 2)
ZnO Powder ASTM カードより		138.6	100	198.6	63.1
(A) 無定形ガラス 基板使用	500°C 4 h	14	100	16	0
	600°C 2 h	8	100	9	1
(B) 電極材被覆 無定形ガラス 基板使用	500°C 4 h	79.6	100	93.1	36.2
	600°C 2 h	8.7	100	56.9	8.6

ふんい気は空気中である

では、あまり改善できない。

以上述べてきたように、電極材として、われわれは主に NESA を用いている。この理由は、他の金属電極材料（たとえば、金・銀・銅・ニッケル・アルミニウム等）を用いると、ZnSe 膜の酸化処理中に電極材料が酸化されたり、ZnSe および ZnO 膜に拡散したり、また真空中へ蒸発したりして、電極材料の膜厚が薄くなり、抵抗値が増大し電極材料としての働きをしなくなるためである。この点 NESA 膜は、この酸化処理に対して比較的安定である。しかし前に述べたように、電極材料を被覆した無定形ガラス基板を用いる限り、できた ZnO 膜の C 軸は基板と垂直に成長しにくくなる。これらの一例を表 2.1 (B) に示す。

超音波 トランスジューサを試作するに当っては図 2.1 に示したような構造をとるため、ベース電極は必ず必要となる。そして縦波超音波 トランスジューサを作るためには、ベース電極上に形成した ZnO 膜の C 軸が基板に垂直に成長させる必要がある。この目的のために次節で述べるような検討を行なった。

2.5 NESA 電極を被覆した無定形ガラス基板を使用して

ZnO 膜の C 軸配向性改善のための検討という目的のために、酸化処理前の ZnSe 膜の C 軸を強く基板に垂直にしておくことは良い方法であるが、これよりもさらに効果のあがる方法は不純物を加えることである。一般に、結晶では不純物を加えることにより、結晶の完全性が良くなったり、特定方向の結晶成長が促進させられたりする効果がある。この例として、ZnSe に関しては、Al⁽⁸⁾ が結晶性の改善に効果があり、CdS に関しては Ag や Li⁽⁹⁾ 等が結晶性の改善および特定方向の結晶成長促進効果をもつことが知られている。われわれは、この考え方を取り入れて検討した。この結果 ZnO 膜に関して、Al および Li を不純物として添加すると比較的效果があることがわかった。

まず Al を不純物として含んだ ZnSe 膜は X 線回折の結果、(111) 面からの回折強度が、次に強い回折強度をもつ (311) 面のそれと比較して非常に強く、ZnSe 膜の C 軸が基板と垂直に成長しているといえる。この ZnSe 膜を酸化処理(600°C, 2 時間, 空気中)してできた ZnO 膜の X 線回折写真を図 2.6 に示した。このように、NESA 電極をつけた基板上にでも Al を不純物として添加することにより C 軸配向性の強い ZnO 膜を形成できることがわかった。

次に不純物として Li を添加した場合について述べる。Li を不純物とし含んだ ZnSe 膜は X 線回折の結果、蒸着条件によりできる膜ごとの C 軸が種々の方向に向いた膜ができる。しかし、これらの膜を酸化処理すると、できた ZnO 膜の C 軸は比較的強く基板と垂直

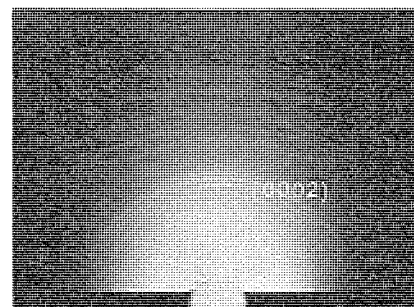


図 2.6 不純物として Al を添加した ZnO 膜の X 線回折写真
(基板: NESA を被覆した パイレックス ガラス 板)
X-ray diffraction pattern of ZnO film doped Al impurity.

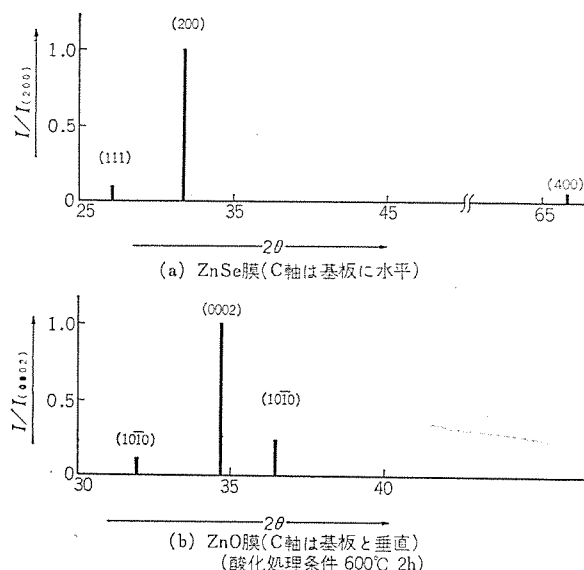


図 2.7 不純物として Li を含んだ時の効果を示す X 線回折図形
(酸化処理により C 軸の向きが変わる)
X-ray diffraction pattern of ZnO and ZnSe film
doped with Li impurity.

に成長する傾向をもつ。

この性質については、2.3 節および 2.4 節で述べたところの不純物を添加していない ZnSe 膜を酸化して作った ZnO 膜では、できた ZnO 膜の C 軸方向は酸化前の ZnSe 膜の C 軸に大きく依存しているのに比べて、大変異なった様子を示す。一例として、図 2.7 に示すように X 線回折の結果、Li を含んだ ZnSe の C 軸が基板と平行になった膜でも酸化すると、できた ZnO 膜の C 軸は基板と垂直になることがわかる。ゆえに、Li を不純物として含むことにより ZnO 膜の C 軸は比較的強く基板と垂直に成長させることができるが、さらに C 軸配向性を良くするために、ZnSe 膜の C 軸を初めから基板と垂直に成長させておけば、ZnO に変換した後で、できた ZnO 膜の C 軸は比較的強く基板と垂直に成長することがわかる。この一例の X 線回折写真を図 2.8 に示す。

他に ZnO 膜の性質として、不純物を添加していない膜は一般に白濁しているが、不純物として Al を添加した膜では、淡い黄色をした透明な膜ができる。さらに不純物として Li を添加した膜では白濁してみえる。これらの関係は電子線回折の結果と対応づけて議論できる。すなわち、不純物を添加していない ZnO 膜では図 2.9 に示すような電子線回折結果を示し、 π -状態であることから、ZnO の微結晶が膜を形成していると考えられ、白濁してみえる原因もここにある。

これに対して、不純物として Al を添加した ZnO 膜の電子線回折

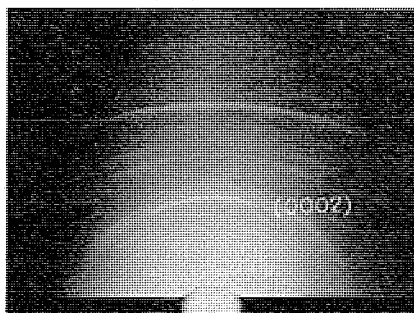


図 2. 8 Li を添加した ZnO 膜の X 線回折写真(基板: NESA を被覆したパイレックスガラス板)
X-ray diffraction pattern of ZnO film doped with Li impurity.

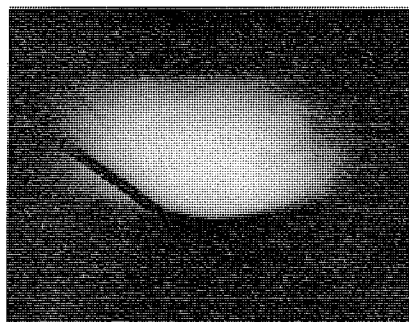


図 2. 9 不純物を添加していない ZnO 膜の電子線回折写真
Electron-diffraction pattern of the undoped ZnO film.

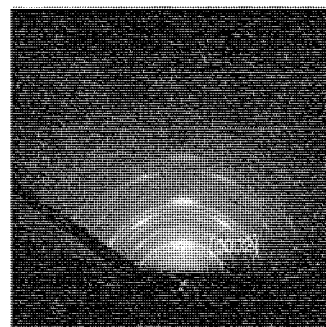


図 2. 10 Al を添加した ZnO 膜の電子線回折写真
Electron diffraction pattern of ZnO film doped with Al impurity.

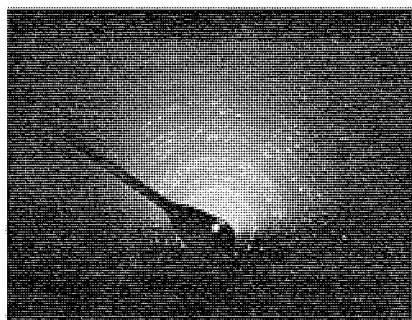


図 2. 11 Li を添加した ZnO 膜の電子線回折写真
Electron diffraction pattern of ZnO film doped with Li impurity

の結果は、図 2. 10 に示すようにスポット状態を示している。これは ZnO 膜の格子面がきれいにできていて、しかも C 軸が基板に垂直に成長しているといえる。これは膜が透明にみえる原因にもなっている。不純物として、Li を添加した ZnO 膜の電子線回折の結果を図 2. 11 に示す。この結果から、微結晶は大きく成長しているが、その軸方向は一定方向に固定されずにあらゆる方向に向いている。これが原因で表面はおうとつ(凹凸)がはげしく、白濁してみえる原因となる。

このように電子線回折は膜の表面のみの情報を得るのに適している。これらのことに関しては、前にも述べたように Li を不純物として含んだ ZnSe 膜が蒸着条件によりできる膜ごとの C 軸が、種々の方向に向くことと関連し、さらに詳しく検討したいと思っている。

2. 6 抵抗値

われわれが提案しているような方法でできた ZnO 膜の比抵抗値を求めてみると表 2. 2 のようになり、不純物として Al や Li を加えることにより膜が高抵抗化している様子がわかる。この中で一般的な傾向として、II_b-VI_b 族化合物半導体の中に I_b 族の不純物が添加されると II_b 元素と置換して高抵抗化する。ゆえにわれわれの場合にも Li を含んだ膜では同様の傾向を示している。しかし III_b 族の Al を添加したとき高抵抗化している原因はさらに詳細に検討中である。

一般的に II_b-V_b 族化合物の中に III_b 族元素を II_b 族元素と置換すれば、低抵抗化するはずである。今回の高抵抗化の原因として、われわれは Al が酸化され Al₂O₃ として安定な形をとり ZnO とかわりを持たなくなるか、または Al は II_b 族元素と置換せず、たとえば格子間に入り、結晶粒子を成長させる働きを持ちながら、電荷中性条件を満たすためであるかのどちらかであろう。超音波トランスジューサとしては、MHz 付近で動作させるためには比抵抗値は 10⁵ Ω

表 2. 2 ZnO 膜の比抵抗値
Resistivity of ZnO film.

試料	比抵抗値 (Ω cm)
不純物添加していない ZnO 膜	~10 ³
Al 1 mol % 添加した ZnO 膜	~10 ⁶
Li 1 mol % 添加した ZnO 膜	~10 ⁵

(ZnSe を 600°C 2 時間 空気中で酸化)

cm 以上あれば十分で、トランスジューサとしての圧電性が発揮できる範囲となる。

3. 結果と議論

2 章で述べた各点を考慮に入れて、図 2. 1 に示した構造の遅延線を組み上げた。その素子を測定治具に治めたところを図 3. 1 に示した。

超音波トランスジューサのそう入損失の測定は図 3. 2 に示したような構成図において行なった。また、この回路は 50 Ω の同軸系で構成されている。入力信号は信号発振器から高周波パルスで与えられる。この入力信号はハイブリッドに導入され、そこで遅延線形試料と精密減衰器の方向へ行くものに分割され、試料から出たエコーパルスが出力端子に導かれる。そう入損失の測定は、サンプルからの信号と精密減衰器を通ってきた参照信号との比から求めた。すなわち、最初のエコーパルスを試料からの信号と考え、このエコーパルスの大きさに等しくなるように、入力信号を精密減衰器で減衰させ、等しくなった点での減衰器の読みを信号の大きさとした。ただし、このような測定から求めた損失には ZnO 膜の変換損失および溶融石英の伝ば(播)損失および溶融石英の裏面での反射損失を含んでいる。

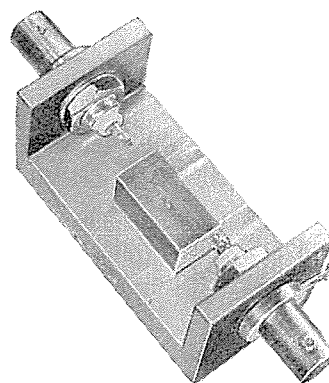


図 3. 1 測定治具内の遅延線形試料
Sample set in the measurement jig.

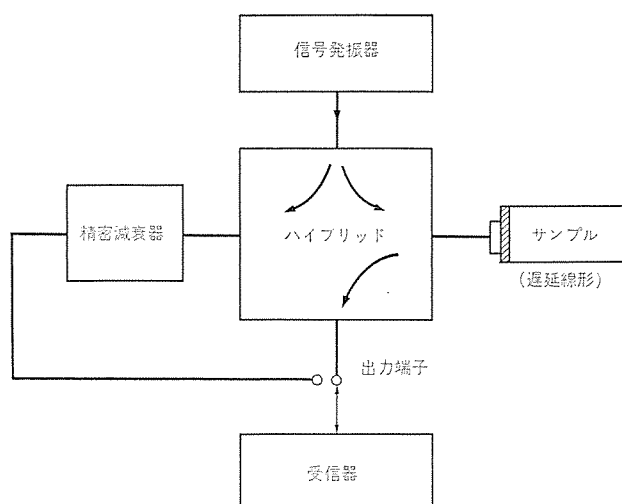


図 3.2 測定回路のブロック図
Block diagram of insertion loss measurement.

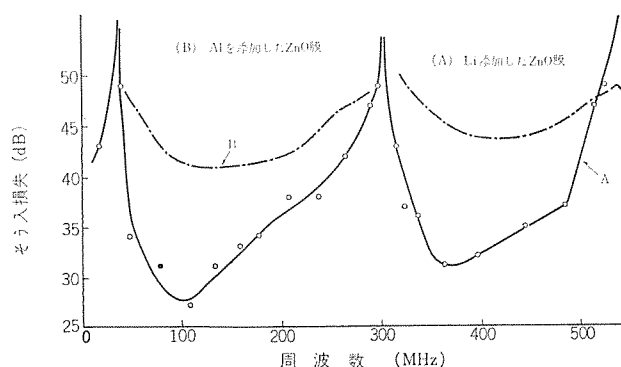


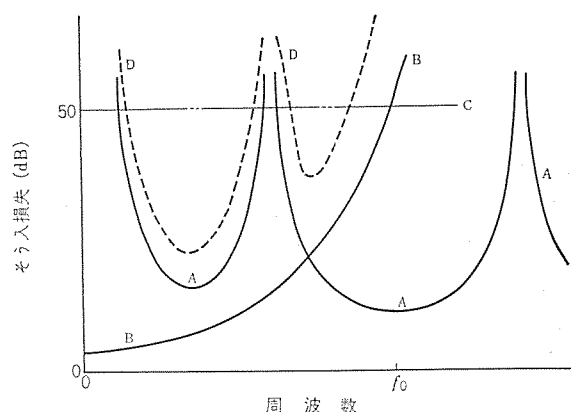
図 3.3 そう入損失の測定結果
Result of loss insertion.

測定結果の一例を図 3.3 に示した。試料として(A)は Li を 1 mol % 添加した ZnO 膜について、また (B) は Al を 1 mol % 添加した ZnO 膜についての結果である。図 3.3 からわかるように周波数特性が 500 MHz くらいまでしか測れていないが、これは遅延材料に熔融石英を用いたためで、測定装置からくる制約でない。

そして、40 MHz, 300 MHz および 540 MHz 付近で不連続となる周波数特性を示し、一方、そう入損失の小さい周波数範囲は 50 ~ 200 MHz および 330 ~ 500 MHz 付近にあり、さらに 10 MHz 付近でも動作するような低周波動作の超音波トランスジューサを作ることができた。

われわれが実験に用いた ZnO 膜の膜厚は約 3 μ m であった。もし厚み振動で縦波が励振されていれば、900 MHz 付近に中心周波数をもつ特性曲線が得られるはずであったが、この点まで測定できなかった。この原因として考えられることとして、前にも述べたように、一般に波の伝ば特性は周波数の 2 乗に比例して増大するといわれており、500 MHz 以上で熔融石英の伝ば損失が極端に増大するためである。また、他の考え方として縦波といっているが、横波が励振されているのではないかという可能性があるが、この点についてはパルスエコーの時間間げき(隙)から求めた音速が約 6×10^5 cm/sec という値からほぼ縦波と考えてよい。

次に周波数特性の不連続点のできる原因として、電極の厚さ効果が考えられる。特にこうした薄膜トランスジューサの場合には、特に上部電極の構造による影響が大きいとされているが、この点、Al 蒸着側については比較的 ZnO 膜に比べて薄く、あまり影響していな



A: 電極の厚さ効果をもった ZnO 膜の変換特性
B: 熔融石英中の伝ば損失
C: 測定器の限界
D: 実験データ

図 3.4 モデル化したそう入損失特性
Modelized characteristic of loss insertion.

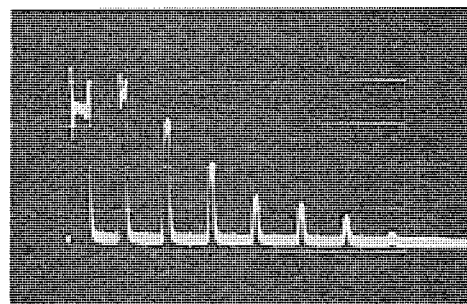


図 3.5 パルスエコー波形 (Al 添加 415 MHz)
Pulse echo waveform (Al dope at 415 MHz)

いと考えられる。そして、もし電極構造によると考えるのであれば、それは主に ZnO 膜厚に近いベース電極である NESA に関係すると考えられる。これらを考慮して全体の傾向をつかむための概略モデルを作ってみると、図 3.4 のようになる。

すなわち、(A) はベース電極の厚さ効果による吸収をもった超音波トランスジューサ特性であり、(B) は熔融石英中での伝ば損失、(C) は最大検出感度レベル、(D) が全体の周波数特性である。

この周波数特性から、実験図の図 3.4 における 110 MHz 付近のほうに 360 MHz 付近のそう入損失に比べて小さくなる傾向がつかめる。また、全体的にみて低周波でのみ動作する超音波トランスジューサができたものと考えられる。しかし、40 MHz 以下でふたたび共振が出はじめる原因が不明である。

変換損失は不純物として Li を添加した ZnO 膜で小さくなっているのは、電気機械結合係数を左右するところの結晶粒の大きさに影響するためであると考えられ、Li を不純物として含んだ ZnO 膜で変換損失の小さい膜となる原因が理解できる。しかし、Li を添加した ZnO 膜では C 軸配向性が悪くなるため、横波の励振も同時に起こり、変換損失の小さい 110 MHz 付近でこの横波を調べた結果、初期エコーの大きさを比較してみると、縦波のそれに比べて約 $\frac{1}{100}$ の横波が認められた。最後に Al を添加した ZnO 膜での 415 MHz のパルスエコー波形を図 3.5 に示した。

4. む す び

われわれが発見した製作方法にもとづく、ZnSe 膜を酸化して作った ZnO 膜も明らかに圧電特性を示すことがパルスエコー法によ

て確認できた。しかも、この ZnO 薄膜の C 軸配向性を考慮することによって比較的効率の良い縦波超音波 トランスジューサ を作ることが可能となった。しかし、製作上、500°C~600°C という酸化処理工程が必要のため、この温度処理を行なっても安定な基板材料しか使えない点が問題である。ZnO 薄膜はこの方法で簡単に製作できることがわかったが、この膜の利用として、光導電材料への応用も考えられるが、これについては紙面の都合で次の機会に報告したい。

最後に パルスエコー 法によるそう入損失の測定に関し有用なアドバイスをいただいた電子総合研究所 御子柴研究室長、ならびにそう入損失の測定に際しご指導をいただいた学習院大学 小川智哉教授、電々公社 武蔵野通信研究所 内田直也氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- (1) Ohnishi, Yoshizawa & Ibuki : Japanese J. Appl. phys., 9, 412 (1969)
- (2) N. F. Foster, G. A. Coquin, G. A. Roggonyi & F. A. Vannatta : IEEE Trans. on Sonics & ultrasonics, SU-15, 28 (1968)
- (3) D. L. Deubnrg : IEEE Trans. on Sonics & ultrasonics, SU-18, 31 (1971)
- (4) M. T. Wank & D. K. Winslow : Appl. Phys. Letters, 13, 286 (1968)
- (5) D. K. Winslow & H. J. Show : IEEE International conversion, Session 37, Pt. 5, 26, New York N. Y. (March, 1966)
- (6) R. F. Belt & G. C. Florio : J. Appl. Phys., 39, 5215 (1968)
- (7) N. F. Foster : J. Appl. Phys., 38, 149 (1967)
- (8) 大西 : 電子材料研究会, 昭和 45 年 2 月, 資料 No. 2
- (9) M. Yoshizawa : J. Phys. Soc. Japan, 25, 637 (1968) ; Japanese. J. Appl. Phys., 10, 1225 (1971)

GaAs 気相エピタキシャル結晶

三木秀二郎*・伊藤 道弘*・織田 隆雄*

GaAs Crystals Grown by Vapor Phase Epitaxy

Central Research Laboratory Hidejiro MIKI・Michihiro ITO・Takao ODA

It is a recent trend that microwave elements made up of GaAs are in extensive use. A study has been made on a GaAs vapor phase epitaxial method using GaAs $\text{Cl}_3\text{-H}_2$ system that is epitaxial growth technique forming the foundation in the manufacture of these elements. Of impurities to be mixed in the GaAs epitaxial layer, Si affects greatly in particular. In order to avoid high resistance region produced on the boundary of the epitaxial and a substrate giving gas etching or making a N^+ buffer layer has proved a good result. By doping with Sn or H_2S the concentration of the epitaxial layer can be controlled and growth of epitaxial crystals of multi layers is made possible.

1. ま え が き

GaAs 結晶は天然に存在しなかったため、研究の歴史は比較的新しい。半導体材料として注目されるようになったのは、1952年のWelkerの報告以来である⁽¹⁾。その後GeやSiとは異なった特長を有していることがわかるにつれて、新しい電子部品への応用分野が拡大しつつある。GaAs結晶の特長としては、電子移動度が大きなことと、エネルギー帯構造がGeやSiと異なっていることである。

GaAsの電子移動度は $5,000\sim 9,000\text{ cm}^2/\text{v}\cdot\text{s}$ もあり、Siのそれよりも数倍大きい。したがってマイクロ波やミリ波用の素子として、ショットキバリアダイード、電界効果トランジスタなどに利用されている。第二のエネルギー帯構造の特長を利用したものとしては、伝導帯間の電子遷移に基づく負性抵抗効果を用いた、ガンダイオードやフォノンが介在しない直接遷移による発光機構のために、高効率を示すレーザダイオードや発光ダイオードの分野に大きな発展をみせつつある。

これらの分野に進出しつつあるGaAsも結晶成長の面では、未だGeやSiの域には到達していない。GaAsの結晶成長はGeやSiと異なり、蒸気圧の高いAs元素を含むことと、化合物であるための化学量論組成からのずれが問題とされていた。また融液からGaAs結晶を成長させる場合には、石英容器からのSiの汚染を生じ、あまり純度のよい結晶は得られていなかった。

一方GaAs結晶のエピタキシャル成長は、Si素子のエピタキシャル技術の成功による刺激と実用上の必要性から研究が行われていた。1959年AntellとEfferはGaのハライドとAsを用いて、気相成長法によるエピタキシャル結晶を製作した⁽²⁾。

1963年に報告されたガン効果は⁽⁴⁾、従来のP-N接合を利用した素子にくらべ、キャリア濃度・移動度・キャリア濃度分布など結晶特性に対する要求は著しくきびしいものがある。またガン効果素子として要求される動作層の厚みは、従来の融液から得られる結晶では、事実上加工不可能な寸法であった。これらのきびしい要求が、GaAsのエピタキシャル結晶成長技術を飛躍的に向上させたともいえる。

気相または液相からのエピタキシャル成長は融液からの結晶成長と比較して、低温で成長を行なわせることができ、不純物の混入する割合が少なく高純度な結晶が得られる。

1965年Knight⁽⁵⁾がGaと AsCl_3 を原料としたGa- $\text{AsCl}_3\text{-H}_2$ 法を用いて、比較的高純度のよいエピタキシャル結晶が得られることを明ら

かにして以来、気相成長法では一般にこの方式が用いられてきた。

ここでは、ガン効果素子を主としたマイクロ波素子用のGaAsエピタキシャル結晶の成長に関する検討を行なった結果を報告する。

2. 気相成長方法と測定方法

GaAs気相エピタキシャル結晶の成長装置は、横形炉と縦形炉の2種類が用いられている。図2.1に示したのは横形炉の写真であり、図2.2にその概略を示す。横形炉は三つの温度領域を有する3ゾーン方式である。第一のゾーンは反応系のAs蒸気圧を制御するため金属ひ(砒)素をおく部分であるが、通常の結晶成長条件では使用しない。

Gaソースは第二のゾーンに設置されていて $800^\circ\text{C}\sim 900^\circ\text{C}$ に保たれている。GaAs基板は、 750°C に保たれた第三のゾーンに設置される。

反応管は高純度な溶融石英または合成石英でつくられており、ガス系はパイレックスガラスおよびステンレス配管が用いられている。

水素純化装置によって精製された高純度水素は、一定温度に保たれた三塩化ヒ素(AsCl_3)の蒸発器を通り、反応管に送りこまれる。反応管の内部にはさらにライナチューブが設置されており、低温側に析出する反応副産物はライナチューブの管壁に析出させ、反応終了後酸洗浄することによって取り除かれる。

実験に用いられたGaと AsCl_3 の純度はどちらも99.9999%と称せられるもので、三菱金属(株)製である。GaAs基板結晶は、主と

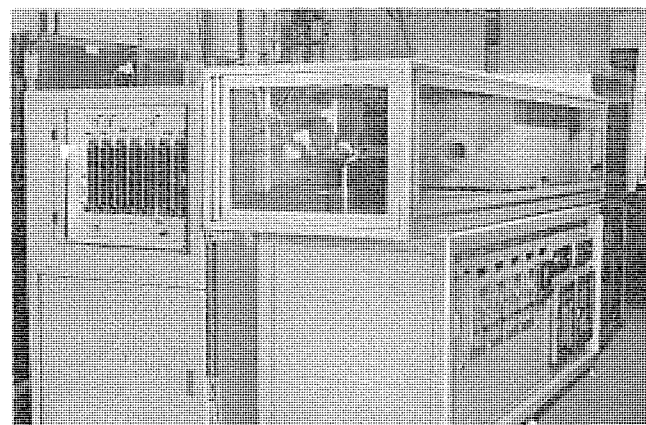


図 2.1 横形 GaAs 気相 エピタキシャル 装置
Horizontal apparatus for GaAs vapor phase epitaxy.

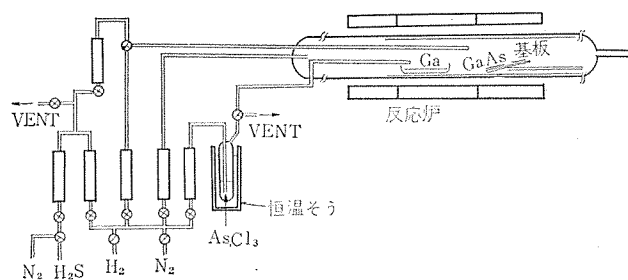
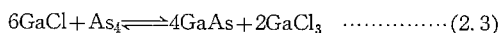
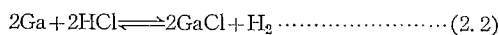
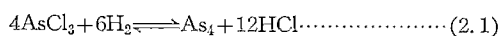


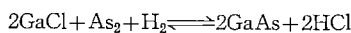
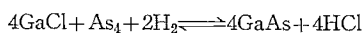
図 2.2 横形 GaAs 気相 エピタキシャル 装置の概要
Schematic diagram of the horizontal epitaxial furnace.

して boat grown 結晶と チョクルスキー 結晶が用いられた。

Ga と AsCl₃ の反応は次式に従って生じていると考えられる。



しかしながら Ban は、質量分析の実験から GaCl₃ はほとんど検出されず、実際には次式の反応が生じているとしている⁽⁶⁾。



基板とエピタキシャル層の間に n⁺ 緩衝層を成長させないときは、通常 2 枚の GaAs 基板を設置して成長が行なわれた。1 枚はエピタキシャル層の電気的特性を測定するためのクロム、または酸素をドーピングした半絶縁性基板であり、他の 1 枚は n⁺ 基板である。n⁺ 基板のドーパントとしては Si, Te, Sn, Ge 等が用いられた。

Cr doped semi-insulating GaAs 基板上の成長層のキャリア濃度および移動度は、van der Pauw の方法または Bridge type の Hall 効果の測定から算出した。

イオン化したドナー不純物濃度 N_D およびアクセプタ不純物濃度 N_A は、77°K におけるホール係数を測定し、Brooks-Herring の式を用いて計算した⁽⁷⁾。

GaAs エピタキシャル層中の微量不純物の分析には、質量分析を用いた。

3. エピタキシャル成長層の性質

気相エピタキシャル成長に使用される AsCl₃ 原料および Ga 原料は最初一定量チャージされ、同一原料を繰り返し使用する。この場合エピタキシャル層の電気的特性は、使用回数とともに変化することが知られている。図 3.1 は同一原料を繰り返し使用したときのドナー濃度 N_D とアクセプタ濃度 N_A の変化を、成長回数の関数として示したものである。使用回数の増加とともに、 N_D , N_A も増加しているのが認められる。これは不純物が Ga または AsCl₃ 中に蓄積され、原料中の不純物濃度が増加し、それにつれてエピタキシャル層中に混入する不純物の割合が増加するものと考えられる⁽⁸⁾。

エピタキシャル層は通常 n 形であるが、まれには p 形に変換していることがある。図 3.2 はそのようなエピタキシャル層を走査形電子顕微鏡によって観察したものである。白く光っている部分が p 形に変換している部分である。p 形変換領域は一様でなく、ある結晶軸方向に沿って分布しているのが認められる。

表 3.1 は、種々の成長条件でエピタキシャル成長を行なった場合の不純物の増加の様子を質量分析で調べた結果である。成長条件としては GaAs 基板温度を 750°C に一定して、Ga ソース温度を 800°C, 850°C, 900°C の 3 種類に保ったときの不純物の混入の程度を調べ

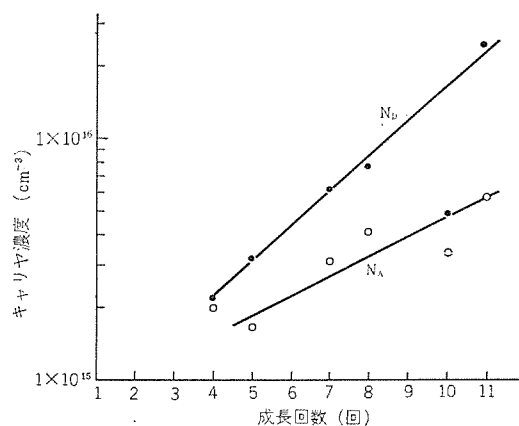


図 3.1 同一原料を繰り返し使用したときのエピタキシャル層のキャリア濃度の変化
Variation of carrier concentration on the epitaxial layers successively grown by using the same source.

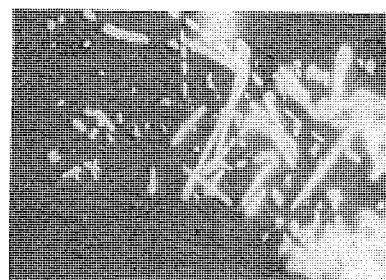


図 3.2 p 形エピタキシャル層の走査電子顕微鏡写真
Photograph of the p-type epitaxial layer by scanning electron microscope.

表 3.1 エピタキシャル層の質量分析結果
Results of mass spectrographic analyses.

試料 No.	1	2	3	4	5	6
成長条件						
Ga 温度 °C	800	800	850	850	900	900
基板温度 °C	750	750	750	750	750	750
成長回数	4	10	3	10	3	9
電気的性質						
キャリア濃度 cm ⁻³	4.8×10 ¹⁵	2.4×10 ¹⁵	3.6×10 ¹⁵	1.7×10 ¹⁵	5.6×10 ¹⁴	2.3×10 ¹⁵
移動度 cm ² /v.s	6,700	6,200	7,600	6,200	5,500	6,100
不純物検出元素 (ppm)						
F	2	6	0.9	5	3	8
Mg	0.5	1	0.5	0.7	0.4	0.7
Al	25	30	4	8	5	0.8
Si	14	25	16	30	13	38
P	0.1	0.4	0.1	0.4	1.2	0.5
Ca	2	4	2	0.4	1.5	5
V	1	2	0.8	1	0.9	1.5
Cr	2	2	1	2	1.7	3
Mn	0.6	1	0.4	0.8	0.5	0.6
Fe	/(16)	20	/(9)	50	/(15)	/(30)
Cu	/(0.35)	3	(0.7)	0.8	/(0.4)	/(0.6)
Zn	/(0.7)	1	0.5	0.8	/(0.9)	/(2)
Sn	/(0.7)	/(0.7)	/(0.5)	/(1)	/(0.7)	/(2)
Te	/(2)	/(2)	/(0.9)	/(2)	/(1)	/(3)
Cd	/(1)	/(2)	/(0.6)	/(2)	/(1)	/(2)

た。F, Mg, Al, Ca, Si, Fe, Cu の濃度は、使用回数の増加とともに増加しているのが認められる。これらの不純物のうち、電気的特性に影響を与える不純物としては、特に Si, Fe, Cu である。この 3 種の元素については、Ga ソースの温度によって、不純物濃度の増加の様子が異なる。Si は成長回数が少ない試料でも十数 ppm 含まれており、Ga ソース温度が高いほど増加する割合は大きい。

表 3.2 エピタキシャル層の電気的特性
Electrical properties of the epitaxial layers.

Sample No.	$N_D - N_A$ cm^{-3}	N_D cm^{-3}	N_A cm^{-3}	$\mu_{77^\circ\text{K}}$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
7	1.3×10^{12}	7.8×10^{13}	7.7×10^{13}	179,000
8	2.0×10^{11}	1.1×10^{14}	1.1×10^{14}	156,000
9	4.6×10^{11}	1.4×10^{14}	1.4×10^{14}	146,000

一方 Cu は使用初期ではその濃度は低いが, Ga ソース 温度が低いほど増加する割合が大きく, Ga ソース 温度が 900°C ではほとんど増加していない。Fe は使用した分析装置の検出感度が低いため, Cu のような正確な値はわからないが, Ga ソース 温度が 800°C の場合は多少増加が認められる。Ga ソース 温度が高温に保たれている場合には, Cu や Fe のような重金属の汚染が認められないのは, それらの不純物は Ga ソース 中に蓄積しないためと考えられる⁽⁹⁾。

これらの不純物のソースとしては, AsCl_3 や Ga のほかに石英反応管から混入する割合が大きい。高純度なエピタキシャル層を得るためには, 石英管の十分な処理が必要である。表 3.2 はエピタキシャル層の電気的特性の一例を示したものである。最高純度を示したものでキャリア濃度 $1.3 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$, 77°K の移動度 $179,000 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ の結晶が得られている。Brooks-Herring の式から求めた N_D と N_A は, それぞれ $N_D = 7.8 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$, $N_A = 7.7 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ である。

4. Si による汚染

溶融法で成長させた GaAs 結晶では, Si による汚染は多数研究されているが, 気相成長法では結晶成長温度が低いため, Si による汚染についてはあまり注目されていなかった。しかし電気的に活性な不純物が比較的少ないと考えられる試料でも質量分析によって, 多量の Si が検出されたことから, 気相エピタキシャル結晶においても Si の汚染があると考えられる。ここでは X 線マイクロアナライザ (EPMA) によって Si の分布や析出物の組成を調べた。

図 4.1 は, Si doped GaAs 基板上に成長させたエピタキシャル層の深さ方向の Si の濃度分布を EPMA によって分析した一例である。Si の汚染が激しい場合は, GaAs 基板とエピタキシャル層の境界に含まれる Si の濃度は, $10^{18} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ に達することがある。エピタキシャル層中に検出される Si は, しばしば析出物として存在していることがある⁽¹⁰⁾。図 4.2 は Si が酸化物として存在している場合の一例である。Si の強度に比例して酸素の強度も増加している。Si と O の強度比から SiO_2 として存在しているものと推定される。これらの Si の汚染源としては, 基板結晶中に含まれる Si のほかに, 気相成長に用いられる石英反応管から混入するものと考えられる。その

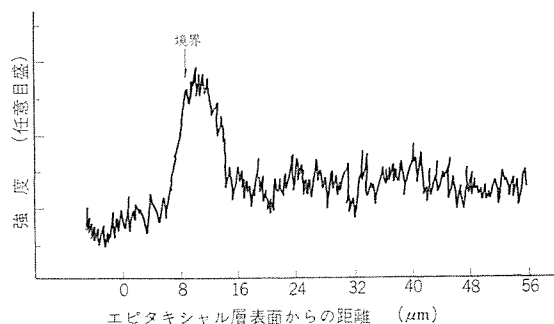


図 4.1 エピタキシャル層と基板の Si の分布
Silicon distribution on epitaxial layer and substrate.

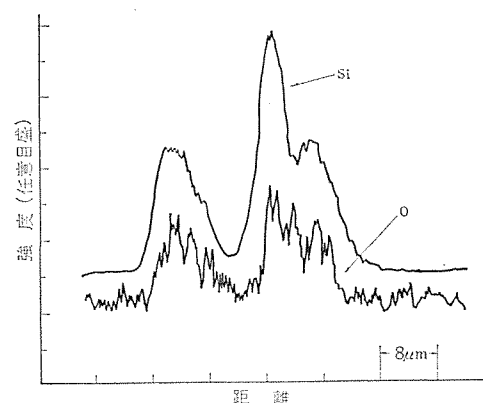


図 4.2 析出物の Si と酸素の分布
Silicon and oxygen distribution at the inclusion.

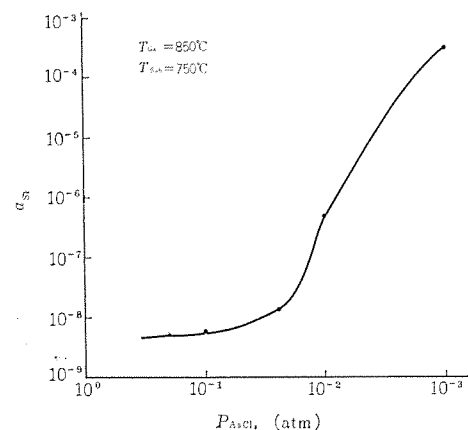


図 4.3 Si の活動度の AsCl_3 濃度依存性
Calculated activity of silicon, a_{Si} , plotted against the pressure of AsCl_3 .

際の反応としては次のものが考えられる。

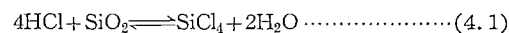


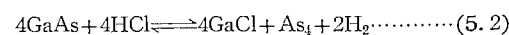
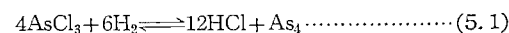
図 4.3 は簡単な仮定を設けて, GaAs 中の Si の活動度を熱力学計算によって求めたものである。系に導入される AsCl_3 の濃度が高いときは, GaAs 中の Si の活動度は 10^{-8} 以下であるが, AsCl_3 の濃度が低くなると急激に増加する。

5. キャリヤ濃度分布の改良

n^+ GaAs 基板上に n^- エピタキシャル層を成長させた場合, 成長層と基板との界面にしばしばキャリア濃度の減少している領域が認められる。この領域は一般に高抵抗層と呼ばれている。高抵抗層の生じる原因については, Cu 汚染説, Si 汚染説, 格子欠陥説など種々の原因が考えられている。このうち Si と高抵抗層の関係についてはすでに報告した⁽¹¹⁾。

高抵抗層を除去するためには二つの方法が有効である。一つはエピタキシャル成長直前に反応管中でガスエッチングを行なう方法であり, 他のも一つは基板と動作層の間に n^+ 緩衝層をエピタキシャル成長させる方法である。

ガスエッチングは AsCl_3 を水素で分解したときに生じる HCl を用いて行なわれた。その場合の反応式としては次のようにあらわされる。



ガスエッチングに関係するのは, HCl の濃度であり反応系中の HCl

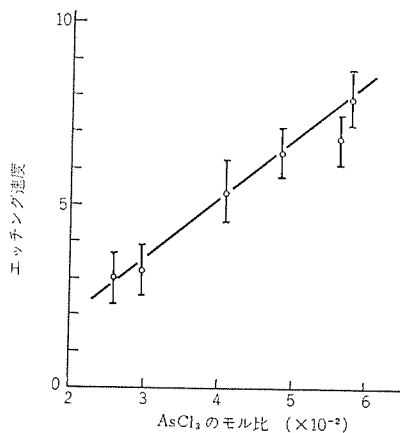


図 5.1 AsCl_3 のモル比とエッチング速度の関係
Etching rate plotted against mole fraction of AsCl_3 .

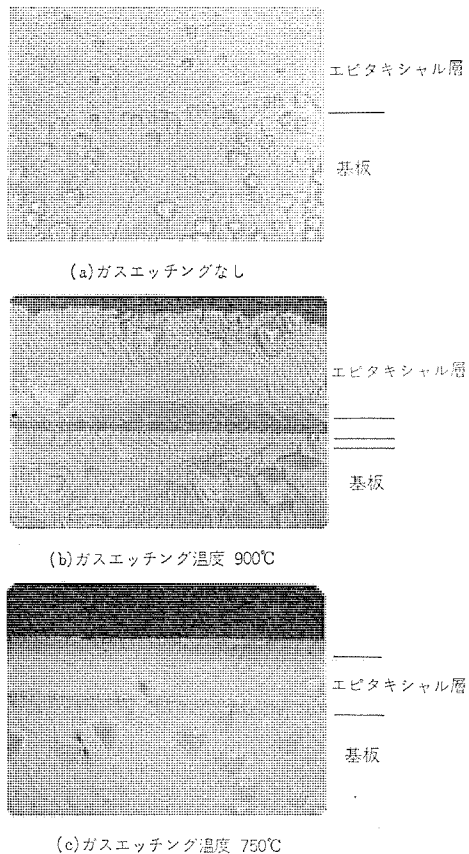


図 5.2 ガスエッチングを行なった場合の境界の異常
Anomalous interface after gas etching.

と GaCl の比によってエッチングに適した温度は変化する。

基板温度とエッチング速度の関係については前回報告したが⁽¹²⁾, GaAs 基板の表面状態は 700°C から 900°C の間では, AsCl_3 の濃度を適当に選ぶことにより, いずれの温度においても鏡面状態のエッチング面を得ることができる。

図 2.1 に示したエピタキシャル装置に, さらに AsCl_3 のパイプを通し, GaAs 基板上に直接 AsCl_3 が輸送されるようにしたときの AsCl_3 の供給量とエッチング速度の関係を図 5.1 に示す。この場合鏡面状態のエッチング面を得るためには, $2\ \mu/\text{min}$ 以上のエッチング速度が必要である。

ガスエッチングされた GaAs 基板の鏡面状態は, エッチング温度によってあまり変わらないが, 引き続きエピタキシャル成長を行なった場合は, 基板とエピタキシャル層との界面の結晶状態が異なっているのが認めら

れた。

図 5.2 に示したのは (100) 基板上にエピタキシャル成長を行なった後, 角度研磨により (111)Ga 面を出し, $\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2$ のエッチング液で 15 分間エッチングして, 基板からエピタキシャル層までのエッチピットの分布を調べたものである。ガスエッチングを行わずに直接エピタキシャル成長を行なった試料では, 界面状態は最も良い。 900°C でガスエッチングを行ない, 引き続き 750°C でエピタキシャル成長を行なった試料では, 成長層と基板の界面に多くのピットの連なり, あるいは多結晶と思われる黒く太い線の存在しているのが認められる。 750°C でガスエッチングを行ない, 同じ温度でエピタキシャル成長を行なった場合は比較的ピットは少ない。

900°C でガスエッチングを施した試料では, キャリヤ濃度分布に異常が認められないにもかかわらず, 電圧—電流特性に整流性が認められることがある。とくに図 5.2 (b) に示したように界面の結晶性が乱れた試料ではその傾向が強い。 750°C でガスエッチングした試料では, そのような整流性は観測されなかった。

6. ドーピング特性

所定のキャリヤ濃度およびキャリヤ濃度分布をもったエピタキシャル層を得るためには, エピタキシャル層へ適当な不純物をドーピングする必要がある。また前節で述べたように, 基板と成長層との界面に生じる高抵抗層の発生を防ぐため, 緩衝領域となる高濃度層を成長させる方法が有効である。

GaAs エピタキシャル層へのドーピング方法は種々用いられているが, n 形ドーパントとして単体の Te を用いて, Ga ソースと GaAs 基板の間に Te を設置する方法についてはすでに報告した⁽¹³⁾。

ここでは Ga ソース中に Sn をドーピングしておく方法と, H_2S のドーピングガスを用いる方法について述べる。

まず Ga ソース中に Sn をドーピングしておく方法は, 比較的低濃度のエピタキシャル層の制御が行なえる利点がある。図 6.1 に示したのは, Ga 中の Sn の添加量を変えたときのエピタキシャル層のキャリヤ濃度を示したものである。 n^+ 基板上のキャリヤ濃度はショットキバリアの電圧—電流特性から求めた値であり, 半絶縁性基板上のキャリヤ濃度は, ホール係数の測定から求めた値である。 n^+ 基板上のキャリヤ濃度

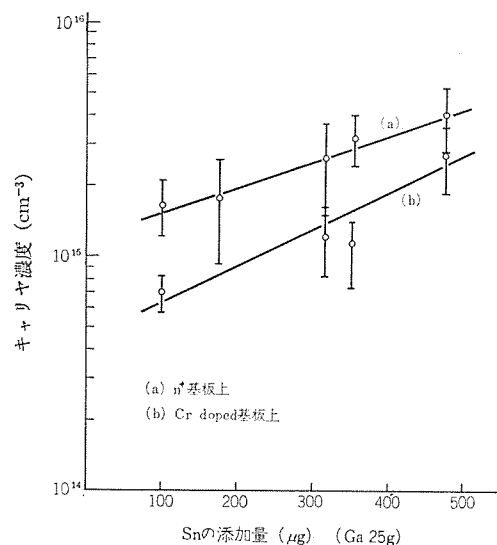


図 6.1 Sn 添加量とエピタキシャル層のキャリヤ濃度
Carrier concentration of epitaxial layer plotted against amount of Sn doped into Ga source (Ga 25 g).

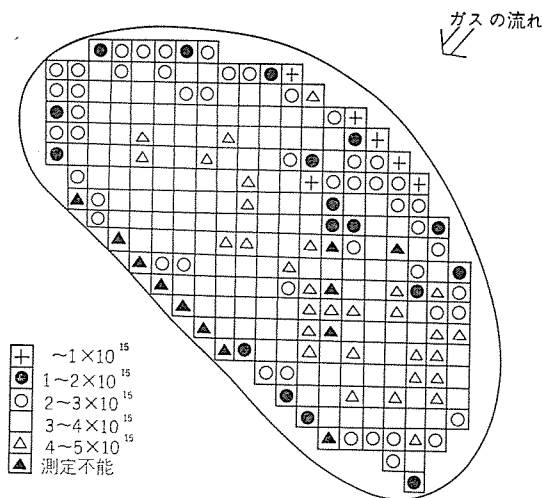


図 6.2 ウエハ内のキャリア濃度分布
Distribution of carrier concentration in an epitaxial wafer.

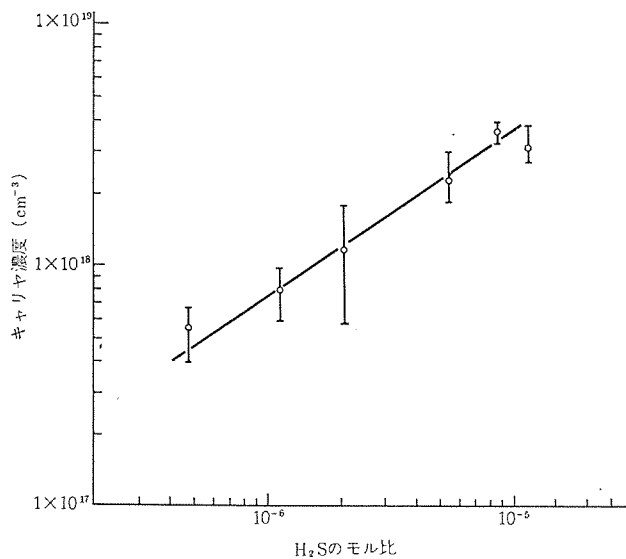


図 6.3 エピタキシャル層のキャリア濃度と H_2 中の H_2S のモル比の関係
Carrier concentration of epitaxial layer against H_2S mole fraction in the hydrogen gas.

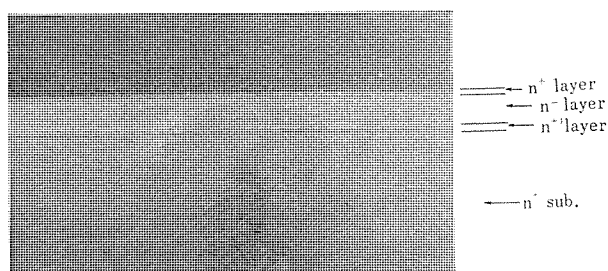


図 6.4 $n^+-n^+-n^+-n^+$ 多層構造
 $n^+-n^+-n^+-n^+$ multi-layer

が常に高くあらわれるのは、測定方法の相違よりも n^+ 基板中のドーパントの影響であろう。 n^+ 基板上のエピタキシャル層の移動度を直接測定するためには、磁気抵抗効果法が用いられている。図 6.2 は、ショットキバリアの容量—電圧特性から求めた 1 枚のウエハ内のキャリア濃度分布を示したものである。基板の周辺と中央部では濃度のちがいが認められる。一般にガスの流れに対して基板の前後を比較した場合は、前部のほうがキャリア濃度が低い傾向にある。

Sn をドーピングした Ga ソースを用いる方法は、低濃度領域のドーピング制御を比較的手軽に行なえる利点があるが、エピタキシャル成長中にキャリア濃度を変化できない欠点がある。

H_2S を用いるガスドーピング法は、ガスの希釈量と流量を調節することによって、エピタキシャル成長層のキャリア濃度を自由に变化させることができる。図 6.3 は H_2 ガス中の H_2S 濃度が 10 ppm のポンプを用いて、反応管へ供給される H_2S の濃度を制御することによって、エピタキシャル層のキャリア濃度を制御したものである。希釈用流量計を一段だけ用いたときは、 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ から $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ にわたって制御が可能である。

図 6.4 は H_2S ガスドーピングを用いて n^+ 基板上に n^+ 緩衝層をエピタキシャル成長させた後、 n^- 層を成長させ、さらにオーミックコンタクトを容易にするための n^+ 層を成長させた一例である。緩衝層を設けることにより、高抵抗層の存在しない良好なキャリア濃度分布が得られている。

これらのエピタキシャル成長技術を用いて、ガンダイオード、インパットダイオード、ショットキダイオードなどの各種のマイクロ波素子が製作され実用に供されている。

7. む す び

各種マイクロ波素子の固体化を進めるための、重要な材料の一つであると目されている GaAs 結晶の気相エピタキシャル成長技術について報告した。Ga-AsCl₃-H₂ 法は、 10^{13}cm^{-3} から 10^{18}cm^{-3} のキャリア濃度を有するエピタキシャル層の成長が可能である。

参 考 文 献

- (1) H. Welker : Z. Naturforsch., 7 a, 744 (1952)
- (2) H. Welker : Z. Naturforsch., 8 a, 248 (1953)
- (3) G. R. Antell et al. : J. Electrochem. Soc., 106, 509 (1959)
- (4) J. B. Gunn : Solid State Commun., 1, 88 (1963)
- (5) J. R. Knight et al. : Solid State Electronics, 8, 178 (1965)
- (6) V. S. Ban : J. Electrochem. Soc., 118, 1,473 (1971)
- (7) H. Brooks : Advance Electro and Electro Phys., 7, 158
- (8) 三木ほか : 半導体トランジスタ研究会資料, SSD-70-21 (昭 45-8)
- (9) H. Miki et al. : The Electrochem. Soc. 1971 Spring Meeting, No. 83
- (10) H. Miki et al. : Japan J. Appl. Phys., 11, 623 (1972)
- (11) 三木ほか : 半導体トランジスタ研究会資料, SSD-71-58 (昭 45-1)
- (12) 藤林ほか : 三菱電機技報, 44, 1,597 (昭 45)
- (13) 石井ほか : 昭 42 春応物学会, 224

低真空形電子ビーム溶接機用プラズマ電子銃

上山 善司*・安永 政司*・佐々木茂雄*・田野 正博*

Plasma Electron Beam Guns for Use in Low Vacuum Electron Beam Welders

Central Research Laboratory Yoshiji UYAMA・Seiji YASUNAGA
Shigeo SASAKI・Masahiro TANO

A plasma electron beam gun has characteristics suitable for an electron beam source of a welder working in this principle. It is simple and rugged in construction at the cathode and operates with no trouble even though the inner pressure of the welding chamber becomes to the degree of 10^{-2} torr.

This report describes design concept of the plasma electron beam gun developed for this specific operation in low vacuum, and also a result of measurement of electron current density distribution at the focus of the beam extracted from the electron beam gun of 10 kW.

1. ま え が き

従来の電子ビーム溶接機では、被溶接物を入れた溶接作業室の内部を、 10^{-4} torr 程度の高真空中に排気して溶接する必要があったが、電子ビーム溶接法が生産手段として普及するにつれて、溶接作業室の内部が、低真空であっても使用できる低真空形電子ビーム溶接機の出現が望まれるようになってきた。そして最近になって⁽¹⁾⁽²⁾、 10^{-2} torr 程度の低真空中で電子ビーム溶接した継手の特性が、高真空中で電子ビーム溶接した継手の特性とほとんど同じであることが確認されるなど、低真空形電子ビーム溶接機の実用性が高まってきた。このような状況のもとで、当社では低真空形電子ビーム溶接機用の電子ビーム源として、プラズマ電子銃を実用化し、これを組込んだプラズマ電子ビーム溶接機を完成させた⁽³⁾⁽⁴⁾。

プラズマ電子銃は、陰極部の構造が簡単かつがんじょうで、溶接作業室の内部が 10^{-2} torr 程度の低真空になっても、ほとんど支障なく動作させることができるなど、低真空形電子ビーム溶接機用の電子ビーム源として適した特性をもっている。

この報告では、当社が実用化したプラズマ電子銃の動作原理・構成、動作気体の選択、出力特性の解析、ウェネルト電極の設計について、10 kW 級のプラズマ電子銃について、電子ビームの集束点における電子流密度分布の実測結果を紹介する。

2. 動作原理と構成

2.1 動作原理

プラズマ電子銃は、中空陰極異常グロー放電 (Hollow Cathode Abnormal Glow Discharge) によって、中空陰極内にできるプラズマから電子ビームを放射する電子銃である。

気体中の放電に関して、「火花電圧 V_s は、気圧 p と電気力線の長さ d との積 (換算電極間距離; Reduced Electrode Separation) の関数として、一義的に表わすことができる。」というパッシェンの法則 (Paschen's Law) がある⁽⁵⁾。図 2.1 は、空気について実測されたパッシェンの曲線の例である。プラズマ電子銃は、パッシェンの曲線のうちで、 $dV_s/d(pd) < 0$ の領域で起こる自続放電現象を利用して、中空陰極内にプラズマを発生させている。

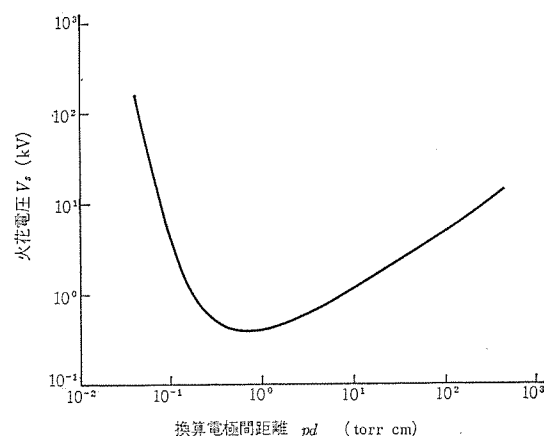


図 2.1 空気についてのパッシェンの曲線
Paschen's curve for air.

2.2 電極構成

図 2.2 に、プラズマ電子銃の原理図を示してある。プラズマ電子銃は、中心軸上に電子ビーム放出孔をもつ中空陰極、それを同軸状に囲むシールド電極・電子銃室と、中空陰極の電子ビーム放出孔と向き合って同軸上に電子ビーム通過孔をもつ陽極とで構成されている。中空陰極は、熱陰極電子銃のウェネルト (Wehnelt) 電極と同じ機能をもっているため、プラズマ電子銃の場合でもウェネルト電極と称している。

2.3 高電圧の印加

電子銃室内を真空中に排気して、シールド電極・電子銃室・陽極をいづれも接地し、ウェネルト電極に電子ビーム加速電圧を印加する。図 2.2 に示すように、ウェネルト電極の電子ビーム放出孔付近を通る電気力線が長く、ウェネルト電極の周辺部を通る電気力線が短くなるように考慮をして、各電極の形状や配置を設計する。

2.4 プラズマ陰極の形成

ウェネルト電極に電子ビーム加速電圧を印加した状態で、電子銃室内に気体を供給し、電子銃室内の気体分子密度を調節すると、電気力線の長い部分から自続放電が始まる。このとき、放電領域の気体分子は電離されて、電子は接地電極側に加速され、 \oplus イオンはウェネルト電極のほうに加速される。自続放電は、ウェネルト電極の電子ビーム放

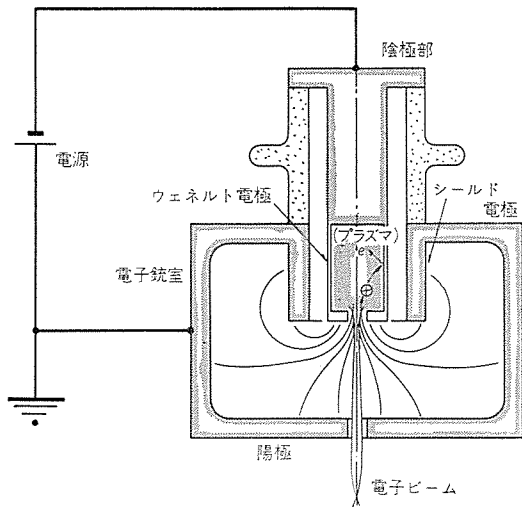


図 2.2 プラズマ電子銃の原理
Schematic diagram of plasma electron beam gun.

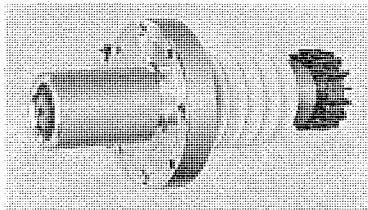


図 2.3 プラズマ電子銃の本体
Plasma electron beam gun.

出孔付近に集中するから、放電領域でできた \oplus イオンの大部分は、電子ビーム放出孔を通してウェネルト電極の空洞内に入り、ウェネルト電極の内壁に衝突する。高速の \oplus イオンが衝突した壁面から二次電子が放出され、この二次電子が空洞内の気体を電離して、プラズマ陰極を形成する。

2.5 電子ビームの形成

ウェネルト電極の空洞内に形成されたプラズマ陰極から、電子ビーム放出孔を通して電子が放射され、電子ビーム加速電圧によって加速されて電子ビームが形成される。

2.6 電子ビーム電流の制御

電子銃室に供給する気体の量を加減して、電子銃室内の気体分子密度を増減すると、ウェネルト電極の電子ビーム放出孔から放射される電子ビーム電流を制御することができる。

2.7 構造

図 2.3 に、10 kW 級プラズマ電子銃の本体を示してある。プラズマ電子銃を運転すると、ウェネルト電極に高速の \oplus イオンが流れ込み、ウェネルト電極は加熱されて、運転開始後一定の時間が経過すると平衡温度に達する。10 kW 級のプラズマ電子銃の場合、ウェネルト電極の冷却は熱放射のみによる方式を用いていて、熱放射冷却の能率を高めるために、シールド電極・電子銃室および陽極など、ウェネルト電極を囲む電極はいずれも水冷している。

3. 動作気体

プラズマ電子銃を動作させるために、電子銃室に供給する気体の種類について検討する。表 3.1 に、代表的気体の諸定数を示してある。

3.1 動作ガス圧

低真空形電子ビーム溶接機では、溶接作業室を排気する真空ポンプ

表 3.1 気体の諸定数
Physical constants for typical gases.

		水素	ヘリウム	窒素	アルゴン	備考
原子番号	Z	1	2	7	18	
分子量	M	2.016	4.003	14.008	39.944	
動作ガス圧(torr)	P_G	3×10^{-2}	6×10^{-2}	1×10^{-2}	6×10^{-3}	
拡散係数(cm^2/s)	D_G	3×10^4	2×10^4	1×10^4	2×10^4	P_G における値
減衰係数 ($\text{torr} \cdot \text{cm})^{-1}$)	α	1.4×10^{-2}	1.8×10^{-2}	1.9×10^{-1}	4.9×10^{-1}	40 keV の電子線に対する値

をメカニカルポンプにすることができる。したがって、電子銃室を排気する真空ポンプをメカニカルポンプにすることができれば、電子ビーム溶接機の真空排気装置をメカニカルポンプだけで構成することができ、取扱いはきわめて容易になる。プラズマ電子銃の動作ガス圧を 5×10^{-2} torr 程度にするためには、ヘリウムが最も適している。

3.2 拡散係数

ガス流量調節弁から電子銃室に供給された気体分子が、プラズマ電子銃のウェネルト電極の位置まで拡散するのに要する時間の平均 τ_m は、近似的につぎの式で与えられる。

$$\tau_m \approx \frac{Z^2}{4D} \quad (3.1)$$

ここで、 Z =ガス流量調節弁の出口からウェネルト電極までの距離、 D =気体の拡散係数である。

気体の拡散係数は、気体分子の密度に反比例するので、表 3.1 には、各気体をプラズマ電子銃の動作気体として使ったときの動作ガス圧に対する拡散係数を示してある。拡散時間を短くするためには、拡散係数の大きい気体を選ぶ必要があるが、気体の種類による差はほとんどないことがわかる。

3.3 電子線の散乱

電子銃室に供給される気体の一部は溶接作業室内に入るので、電子銃から放射された電子線が溶接室内を走行するとき、気体分子との衝突のために、電子線の散乱が起こる。

電子線が気体中を走行するとき、特定の距離を散乱しないで通過する電子線の割合 η_e は、つぎの式で与えられる。

$$\eta_e = e^{-\alpha pl} \quad (3.2)$$

ここで、 α =減衰係数、 p =気体の圧力、 l =走行距離である。

表 3.1 に、40 keV の電子線が、300°K の気体中を走行する場合について、減衰係数を示してある。溶接作業室内の気体の圧力が高くなっても、電子線の散乱が起こらないようにするためには、水素が最も適していて、次いでヘリウムがよい。

3.4 その他

うえにのべたことを考慮して、低真空形電子ビーム溶接機用プラズマ電子銃の動作気体を選べば、水素またはヘリウムということになるが、不活性気体が良いということで、総合的評価をした場合、ヘリウムが最もすぐれている。

なお、プラズマ電子銃の動作気体として、窒素またはアルゴンを用いたほうが、電子ビーム性能が良くなるという説があるが、当社で試験した範囲では、顕著な差がでなかったため、当社のプラズマ電子銃の動作気体としては、ヘリウムを採用している。電子ビーム性能に関しては、さらに詳しい考察が必要であろう。

4. 出力特性

4.1 特性解析

プラズマ電子銃の運転時に、ウェネルト電極の温度が、平衡温度に達するまでのようすを解析しておく。

ウェネルト電極の温度が過渡状態にあるとき、単位時間内にウェネルト電極に蓄積される熱量は、 \oplus イオンによってウェネルト電極に運ばれる熱エネルギーと、熱放射によってウェネルト電極から放射される熱エネルギーとの差である。この蓄積熱量のために、 dt 時間内にウェネルト電極の温度が dT_K だけ上昇したとすれば、つぎの式が成り立つ。

$$C_K \rho_K S_K h_K dT_K = [\eta_i W_K - S_K F_K \epsilon_K \sigma (T_K^4 - T_0^4)] dt \dots (4.1)$$

ここで、 C_K =ウェネルト電極材料の比熱、 ρ_K =ウェネルト電極材料の密度、 S_K =ウェネルト電極の熱放射面積、 h_K =ウェネルト電極の肉厚、 $W_K = V_K \times I_K$ 、 V_K =陰極電圧 (=電子ビーム加速電圧)、 I_K =陰極電流、 $\eta_i = W_K$ のうち、 \oplus イオンによってウェネルト電極に運ばれる電力の割合、 ϵ_K =ウェネルト電極材料の熱放射係数、 F_K =形態係数、 σ =黒体放射率、 T_K =ウェネルト電極の温度、 T_0 =水温。

式(4.1)を積分すると、プラズマ電子銃の運転開始後の経過時間 t とウェネルト電極の温度 T_K との関係が求められ、つぎの式のようになる。

$$\frac{1}{2} [\tan^{-1} x + \tan^{-1} x]_{x_0}^{x_K} = \frac{F_K \epsilon_K \sigma}{C_K \rho_K h_K} T_{Km}^3 t \dots (4.2)$$

$$T_{Km} = \sqrt[4]{\frac{\eta_i W_K}{S_K F_K \epsilon_K \sigma} + T_0^4} \dots (4.3)$$

ここで、 T_{Km} =ウェネルト電極の平衡温度、

$$x_K = \frac{T_K}{T_{Km}}, x_0 = \frac{T_0}{T_{Km}} \dots (4.4)$$

図4.1に、 $T_0 = 300^\circ\text{K}$ の場合について、ウェネルト電極の温度上昇のようすを示してある。

4.2 ウェネルト電極の設計

式(4.3)を書き換えると、つぎの式が得られる。

$$W_K = \frac{1}{\eta_i} S_K F_K \epsilon_K \sigma (T_{Km}^4 - T_0^4) \dots (4.5)$$

式(4.5)からわかるように、プラズマ電子銃の出力特性は、ウェネルト電極の設計にかかっているといても過言ではない。ウェネルト電極の形状・大きさ・材料などについて検討する。

4.2.1 ウェネルト電極の形状

図4.2に、ウェネルト電極の形状を示してある。プラズマ電子銃から安定かつ効率よく電子ビームを取り出すためには、ウェネルト電極の形状は、つぎの経験則を満たす必要がある。

$$0.2 \leq \frac{d}{D} \leq 0.3 \dots (4.6)$$

$$0.1 \leq \frac{d^3}{D^2 h} \leq 0.2 \dots (4.7)$$

表4.1に、プラズマ電子銃のウェネルト電極について、Stauffer らによる設計例と、筆者らによる設計例を示してある⁽⁴⁾。式(4.5)の中で、 η_i はウェネルト電極の形状によって異なり、筆者らの設計したプラズマ電子銃では、6%前後になっている。

4.2.2 ウェネルト電極の材料

ウェネルト電極の冷却を熱放射のみによらずとすると、ウェネルト電極の材料としては、高融点材料に限られる。表4.2に、従来から電子管用として用いられている代表的な高融点材料の物理定数を示して

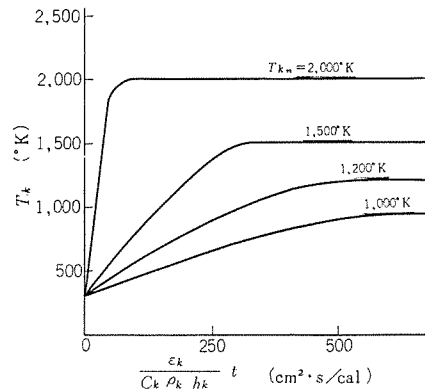


図 4.1 ウェネルト電極の温度上昇
Temperature rise of Wehnelt electrode.

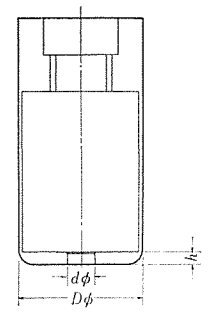


図 4.2 ウェネルト電極の形状
Shape of Wehnelt electrode.

表 4.1 ウェネルト電極の設計例
Design examples of Wehnelt electrode.

	D(mm)	d(mm)	h(mm)	d/D	d ³ /D ² h
Stauffer によって設計されたウェネルト電極の形状	25	7.1	3.2	0.284	0.179
	38	7.9	2.8	0.208	0.120
著者が設計したウェネルト電極の形状	30	7.0	3.85	0.233	0.100
	40	9.0	4.50	0.225	0.104

表 4.2 ウェネルト電極用の材料
Material for Wehnelt electrode.

	グラファイト	モリブデン	タンタル	タングステン
原子番号 Z	6	42	73	74
原子量 M	12.011	95.95	180.95	183.86
密度 ρ_K ($\times 10^3 \text{ kg/m}^3$)	2.24	10.2	16.6	19.6
比熱 C_K (kcal/kg $\cdot^\circ\text{K}$)	0.4	0.08	0.04	0.04
熱放射係数 ϵ_K	0.95	0.2	0.2	0.2
熱伝導率 λ (kcal/ms $\cdot^\circ\text{K}$)	0.01	0.02	0.02	0.03
熱膨張係数 α ($\times 10^{-6}/^\circ\text{K}$)	0.6	6	7	5
融点 T_m ($^\circ\text{K}$)	4,120 \pm 50	2,900 \pm 50	3,270 \pm 50	3,680 \pm 50
実用最高温度 T_{Km} ($^\circ\text{K}$)	\sim 1,950	\sim 1,900	\sim 1,850	\sim 2,000

ある。

(1) 実用最高温度

プラズマ電子銃のウェネルト電極は、熱電子放射が無視できる温度で使用する必要がある。表4.2に、実用最高温度として、熱電子放射率が1 mA/cm²になる温度を示してある。いずれも1,900 $^\circ\text{K}$ 前後になり、材料による差はない。しかし、局所的な温度上昇や突発的な温度上昇に対する耐性を考慮すれば、融点の高いグラファイトがすぐれている。

(2) 熱放射係数

グラファイトがすぐれていることは論を待たない。

(3) その他

図4.1でわかるように、ウェネルト電極の平衡温度が同じになる条件で運転すると、ウェネルト電極が平衡温度に達するまでの時間は、 $(C_K \rho_K / \epsilon_K)$ に比例する。グラファイトがすぐれていることがわかる。この他、グラファイトは熱膨張係数が小さいなど、ウェネルト電極の熱的性質から材料を選べば、グラファイトが抜群にすぐれている。

4.2.3 ウェネルト電極の寸法

図4.3は、今日までにStauffer らによって報告されたプラズマ電子銃と⁽⁶⁾、筆者らが試作したプラズマ電子銃について、ウェネルト電

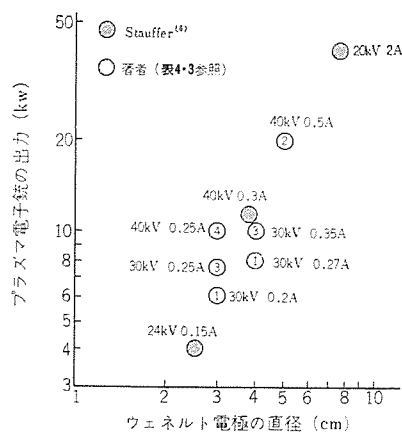


図 4.3 プラズマ電子銃の出力
Output power of the gun.

表 4.3 プラズマ電子銃の特長
Special feature of each gun.

図 4.3○印内の番号	1	2	3	4	Stauffer
ウェネルト電極の冷却	熱放	熱放	熱放	熱放	水
シールド電極の冷却	熱放	熱放	熱放	熱放	熱放
動作気体	ヘリウム	ヘリウム	ヘリウム	ヘリウム	窒素
ウェネルト電極の材料	モリブデン	ステンレス	グラファイト	グラファイト	モリブデン

極の直径とプラズマ電子銃の最高出力の関係を示している。

それぞれのプラズマ電子銃の特長を表 4.3 にまとめている。動作気体や電極の冷却方式がまったく異なるが、ウェネルト電極の直径を同じにすると、プラズマ電子銃の最高出力はほぼ同じであることがわかる。筆者らが試作したプラズマ電子銃の場合、最高出力におけるウェネルト電極の平衡温度は、1,150°K になる。

5. 電子流密度分布の測定

5.1 測定方法

従来、電子ビーム溶接機用電子銃の電子ビーム性能を記述する場合、ステンレス鋼板上にビード (Bead) を走らせて、その溶け込み形状を実測する方法が採られていたが⁽⁴⁾、ここでは電子ビームの電子流密度分布を測定する方法を用いた。測定原理については、付録で説明している。

5.2 測定結果

図 5.1 に、電子ビームの電子流密度分布を測定する要領をしめしている。プラズマ電子銃のプラズマ陰極から放射された電子ビームを、第1レンズによって平行にして第2レンズまでみちびき、第2レンズによって、第2レンズの主面下 100 mm の位置に集束して、集束点における電子流密度分布を測定した。

プラズマ電子銃の動作条件はつぎのとおりであった。

- (1) ウェネルト電極の直径=30 mmφ
- (2) 電子ビーム加速電圧=40 kV
- (3) 陰極電流=250 mA

図 5.2 に、測定結果を示している。電子流密度分布の半値幅で電子ビームの直径を記述すると、集束点における電子ビームの直径は 0.36 mmφ である。

6. む す び

低真空形電子ビーム溶接機用の電子ビーム源として実用化したプラ

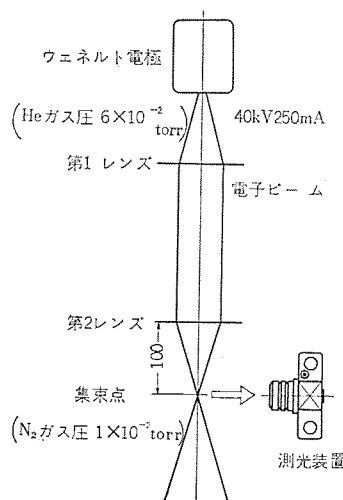


図 5.1 電子流密度分布測定
の要領

Scheme of measurement of
electron current density distribution.

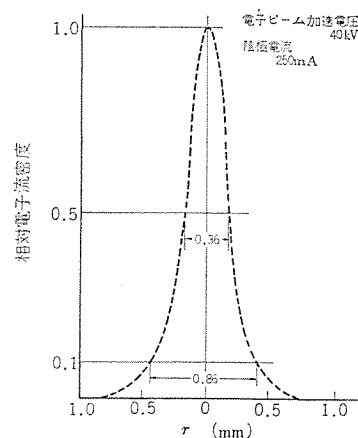


図 5.2 電子流密度分布の実測結果
Distribution of electron current.

ズマ電子銃の設計概念と、電子ビームの集束点における電子流密度分布の測定結果について紹介した。

プラズマ電子銃の動作気体としては、ヘリウムを採用している。ヘリウムを用いると、プラズマ電子銃の動作圧力が 6×10^{-2} torr になり、電子銃室を排気する真空ポンプをメカニカルポンプにすることができる。その結果、低真空形電子ビーム溶接機の真空排気装置は、メカニカルポンプだけで構成できることになり、取扱いが簡単になった。また、ヘリウムは、電子線との衝突断面積が小さいので、電子ビーム電力の減衰がすくないという利点もある。

プラズマ電子銃のウェネルト電極材料としては、グラファイトを用いている。グラファイトは、高融点材料の中でも熱的性質が群を抜いてすぐれており、過酷な使用にも耐えることができる。ウェネルト電極の直径が 30 mmφ のプラズマ電子銃を、陰極電圧 40 kV、陰極電流 250 mA で動作させると、ウェネルト電極の平衡温度は、1,150°K になった。電子ビームの集束点における電子流密度分布を測定した結果、密度分布の半値幅 (直径) は、0.36 mmφ であった。

今後は、陰極電圧を 60 kV にして、電子ビーム電力を高めるとともに、電子ビームの性能をさらに改善する予定である。

参 考 文 献

- (1) Meyer W. E., et al. : Schweitzen und Schneiden Jahrgang, 20, Heft 6, 261 (1968)
- (2) 橋本, ほか : 溶接学会誌, 38, No. 10, 1,097 (昭 44)
- (3) Ueyama Y., et al. : Mitsubishi Denki Laboratory Report, 11, No. 4, 241 (1971)
- (4) 上山, 坂元, 安永, 田中, 奥村, 井藤 : 三菱電機技報, 45, No. 10, 1,304 (昭 46)
- (5) Paschen F : Wied. Ann., 37, 69 (1889)
- (6) Stauffer L. H. : Third International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, 206 (1968)

1. 測定原理

電子ビームの軌道領域に気体を導入すると、電子線の軌跡にそって、気体の電子線けい(螢)光が放射される。この電子線けい光の放射輝度分布を測定すると、電子ビームの電子流密度分布を求めることができる。

電子流密度分布の測定精度を高めるためには、つぎに示す条件を満たす必要がある。

(1) 電子線が直接原因になって放射されるけい光の放射光子束密度が、電子線以外の原因によって放射されるけい光の放射光子束密度にくらべて十分に高いこと。

(2) 電子流密度と放射光子束密度とが比例関係にあること。

(3) 測光できる程度の放射輝度が得られること。

(4) 気体分子との衝突による電子の散乱が無視できること。

2. 理 論

2.1 気体の種類

電子ビームの軌道領域に導入する気体として窒素ガスが用いられる。窒素ガスの電子線けい光は、90%以上が電離状態の分子から放射され、電子線以外の原因によって放射されるけい光の放射光子束密度の割合は、他の気体にくらべて小さい。

2.2 電子流密度と放射光子束密度

特定のエネルギーに加速された電子線の場合は、電子の速度は一定であるから、電子流密度は電子の密度だけに比例する量となる。このとき、電子線けい光の放射光子束密度 j は、つぎの式で表わされる。

$$j = k_1 n_e n_a G \left(\frac{n_e}{n_a} \right) \quad \text{..... (付・1)}$$

ここで、 k_1 =気体の種類と電子の速度で定まる定数、 n_e =電子の密度、 n_a =気体分子の密度である。

電子線の軌跡にそって放射される光子束の密度が、電子流密度と比例関係にあるためには、式(付・1)において $G(n_e/n_a)$ が定数でなければならない。理論的考察の結果によれば、 n_e/n_a が1より十分小さいとき、 $G(n_e/n_a) \simeq 1$ となる。実験結果によれば、 $n_e/n_a < 10^{-4}$ のとき、 $G(n_e/n_a) = 1$ であることが確認できた。

2.3 電子線の散乱

気体分子密度を高くすると、電子線けい光の放射輝度が高くなり、しかも電子流密度と放射光子束密度との比例関係が良くなる反面、

気体分子との衝突のために散乱される電子の割合が大きくなり、電子ビームの真の電子流密度を保存することができなくなる。したがって、気体の圧力は適当な値に選ぶ必要がある。

2.4 放射光子束密度分布と放射輝度分布

電子線けい光の放射光子束密度分布が軸対称で、半径方向の分布が $j(r)$ であるとする、電子ビームの側面から測光して得られる放射輝度分布 $J(x)$ は、つぎの式で与えられる。

$$J(x) = 2 \int_0^{\infty} \frac{r \cdot j(r)}{(r^2 - x^2)^{1/2}} dr \quad \text{..... (付・2)}$$

したがって、気体の電子線けい光を測光して、放射輝度分布 $J(x)$ が求められれば、式(付・2)を用いて放射光子束密度分布 $j(x)$ を計算することができる。

3. 測定精度の確認

半径方向の電子流密度分布が一様で、半径 a の電子ビームの場合、電子線けい光の放射光子束密度分布 $j(r)$ はつぎのようになる。

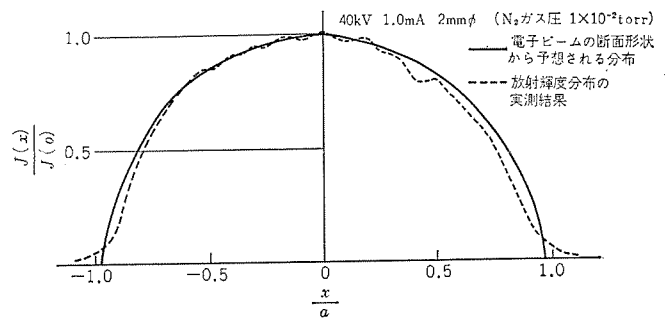
$$j(r) = \text{const} \quad (r \leq a) \quad \text{..... (付・3)}$$

$$j(r) = 0 \quad (r > a) \quad \text{..... (付・4)}$$

したがって、電子ビームの側面から写真測光したときに得られる放射輝度分布 $J(x)$ は、つぎの式で与えられる。

$$\frac{J^2(x)}{J^2(0)} + \frac{x^2}{a^2} = 1 \quad \text{..... (付・5)}$$

付図1は、電子流密度分布が一様で、半径1mmの電子ビームによって放射されるけい光の放射輝度分布である。電子ビームの断面形状から予想される放射輝度分布を、実線で示して比較してある。



付図1 放射輝度分布の実測結果
Brightness distribution of fluorescent light.

省力化, 自動化機器へのミニコンの導入

蘆原 智*・壺井 芳昭*・弘中 一光*
正田 茂男*・丸山 寿一*・白石 彊*

Application of Mini-Computers to Labor Saving and Automated Equipment

Manufacturing Development Laboratory

Satoru HAGIHARA・Yoshiaki TSUBOI・Kazumitsu HIRONAKA
Shigeo MASADA・Hisaichi MARUYAMA・Tsuyoshi SHIRAISHI

As machinery turns to be intricate and of high performance for the sake of labor saving and automation in the operation, a function of high degree judgement and sequence control become necessary to it. In this connection a mini-computer is being put to practical use in place of the control circuits by means of the conventional relays or transistors for the control of the equipment. Description is made on the following as practical examples in these fields.

(1) Computer controlled NC, (2) Industrial robots, (3) Automatic loading and unloading system for NC lathe, (4) Automatic sorting conveyer system, (5) Automatic test equipment.

1. ま え が き

生産性の向上, 労働力の不足, 労働環境の改善さらには製品の多様化などに対する解決策として, 各種の省力化・自動化機器が実用に供されるとともに, より複雑で高性能な装置の開発が進められ, さらには自動生産システムへと発展しつつある。一方, ここ数年で著るしい伸びを示したミニコン(ミニコンピュータ)は, 高性能・低価格とフレキシビリティの点で, これら複雑化する省力化機器, 自動生産システムの制御に最適であり, 経済的にも十分採用が可能になってきた。

ここでは, 今後, ミニコン応用の大きな分野の一つを占めると考えられる, 生産システムへのミニコンの導入として, 各種省力化機器の制御に適用した事例について述べる。

2. ミニコンの導入

生産の省力化・自動化のための機器が, 複雑で高性能になるにしたがって, その制御には高度の判断機能と複雑なシーケンス制御が要求されるようになった。このため, 従来のリレーあるいはトランジスタによるシーケンス制御回路では, 応答速度および大きさの点で実用に供し得ない場合も多い。ICの採用により, これらは一応の解決は得られるが, 複雑なシーケンス制御回路を対象機器ごとにいちいち設計することは, 時間と費用の点で問題が残る。また, せっかく完成した制御回路も, 機器のわずかな仕様変更によって, 大幅な設計変更と手なおしが要求される。ここで, 当然のなりゆきとしてミニコンの応用が注目されはじめたわけである⁽¹⁾。

この背景としては, トランジスタからIC, さらにはLSIへと, 技術の進歩とともに, 1960年当初は数千万円もした中形コンピュータと同じ性能のものが, 現在では数百万円以下のミニコンとして利用可能になったことがあげられる。数年後には, 半導体メモリ, LSIの採用により, 50万円以下のミニコン(4k語のメモリを持った本体のみ)も市販されるであろう⁽²⁾。

省力化・自動化機器の制御にミニコンを応用した場合, 下記のような利点があげられる。

(1) 高速入出力機能を活用し, 複数台の同種あるいは異種の機

器の同時多重制御

(2) 算術演算機能を活用した計算制御

(3) プログラムを変えることにより, 制御シーケンスあるいは条件を変更できるフレキシビリティ

(4) 記録・作表などのデータロギング

(5) 他のコンピュータとの高速情報交換

ミニコンの価格の低下とともに, 比較的簡単な装置(システム)にもコスト的に導入が可能になりつつある⁽³⁾⁽⁴⁾。

省力化・自動化機器が多くなり, これらの管理運用をより合理的に行なうためには, 個々の機械装置だけではなく, 総合的な生産システムとして考える必要がある。つまり, ローカルな省力化・自動化よりも, トータルシステムとしての最適化をはかることが重要になる。このため, 各種機器の制御だけではなく, それらの実動状況・生産量などの情報データをオンラインで収集し, 分析することにより, ダイミックに工程計画・生産計画の最適化が行なわれる。

また, 製造工程だけではなく, 設計の自動化さらには経営情報と, あらゆる分野の情報処理にコンピュータを利用し, それらに有機的なつながりを持たせることが, 総合生産システムとしてのコンピュータ利用の方向であろう^{(5)~(8)}。

コンピュータを利用した生産システムの形としては, 図2.1に示すように大別して三つのレベル(階層)が考えられる⁽⁹⁾。本文では, おも

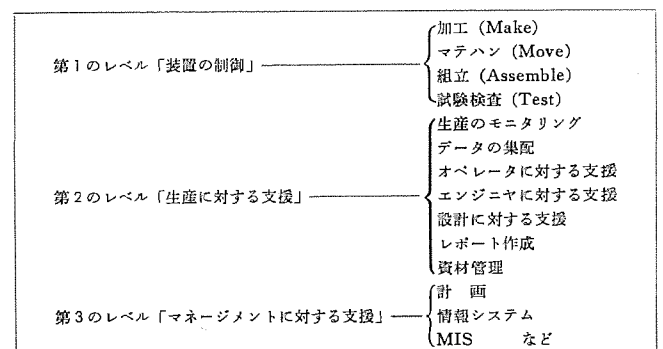


図 2.1 コンピュータの助けをかりた製造システム
Computer aided manufacturing system.

に第1のレベルである装置の制御について述べるが、この分野はまさにミニコンの独壇場である。現在、われわれは、第2のレベルについても応用を進めつつあるが、このレベルもかなりの部分にミニコンの適用が可能であると考えられる。

3. NC への計算機導入

工作機械へのNCの導入による省力化・合理化が急速に進んでいる。しかし単能機としてのNCは、技術的には飽和の域に達した感があり、今後は利用技術を主にしたソフトウェアの面での充実が必要で、すでに自動プログラムも多く開発されている。

一方、NC応用技術は、工作機械のみならず、製図機や各種自動化機器の制御に用いられているが、さらに溶接機や放電加工機にまで利用され、その結果、新しいタイプの制御装置の必要性がさげばれている。またミニコンの発展により、工作機械の複数台制御が検討され、生産システムの自動化へのアプローチが見られる。

当生産技術研究所では、このような背景のもとにNCへの計算機導入として、

- (a) ミニコンによる工作機械の制御
- (b) ミニコンによる複数台制御

を検討し、システムの開発を行なっている。このように計算機を導入することのメリットとして次のものがあげられる。

- (1) 複数台の機械を同時に制御することにより経済的なシステムになる。
- (2) システムの拡張が容易である。
- (3) 信頼性が向上する。
- (4) 生産管理ができ総合的な能率向上が期待できる。

3.1 ミニコンによる旋盤の制御

3.1.1 ハードウェアの構成

ミニコン制御による旋盤システムは、図3.1に示すようにCPUとNCインタフェースよりなる指令部と、紙テープリーダー、操作パネルおよびサーボ制御回路からなるMCU (Machine Control Unit) と旋盤から構成される。指令部のNCインタフェースとMCUは従来の個別NCに代わるものであるが、NC機能は大部分ミニコンのソフトウェアによって実現されているため、従来の個別NCのハードウェアに比べて簡単な構成となっている。特にNC制御の基本となる補間機能はすべてミニコンのソフトウェアで処理されている。

すなわち、紙テープリーダーから読み込まれた移動指令値は、ミニコン内で移動速度に比例した微小直線素子に分割されて出力され、NCインタフェース内の小容量のパルス分配器によってパルス列に変換され、MCUのサーボ制御回路に送られる(特許申請中)。このようなソフトウェアインターフェーションにより、従来の方式に比べハードウェアロジックが大幅に減少した点が、このシステムの大きな特長である。図3.2はシステムの外観を示す。

3.1.2 ソフトウェアの構成

機械制御のプログラムは、割込みレベルで動作するREADプログラム、MAINプログラムおよびMOTIONプログラムとベシックレベルで動作するDISPLAYプログラムの四つからなる。

(1) READプログラム

MCUの紙テープリーダーから加工データを読み込むプログラムで、各ワードごとにバックしてコア内のデータバッファにストアする。絶対値から相対値への変換を同時に行なう。

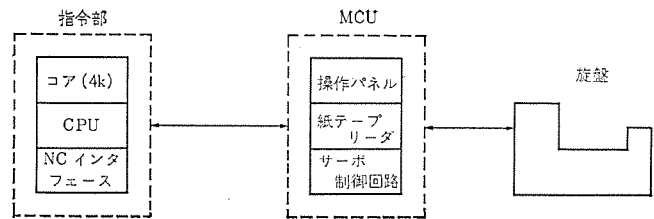


図 3.1 ミニコン NC 旋盤 システム
Configuration of NC lathe system controlled by a mini-computer.

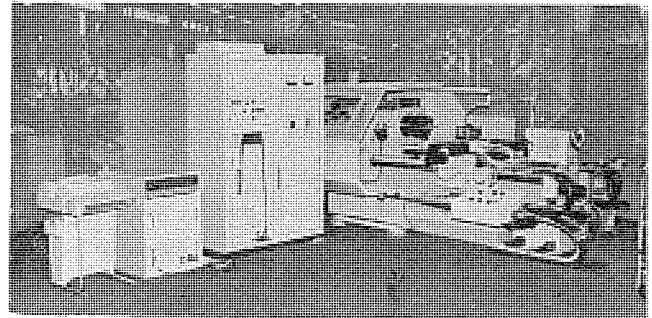


図 3.2 ミニコン NC 旋盤 外観
Exterior view of NC lathe system.

表 3.1 NC 機能
Specification of NC.

	項 目	仕 様
1	テ ー プ コ ー ド	EIA RS 244 A に準拠
2	テ ー プ フ ォ ー マ ッ ト	
3	制 御 軸 数	2 軸, 同時 2 軸
4	補 間	直線, 円弧
5	指 令 方 式	アブソリュート/インクレメンタル併用
6	指 令 単 位	0.01 mm 直径指定
7	最 大 指 令 値	$\pm 2^{11} \times$ 指令単位
8	送 り 速 度	切削送り 1~3,000 mm/分 早送り 最高 10,000 mm/分
9	自 動 加 減 速	あり G 指令による
10	補 助 機 能	2 けた (M00~99)
11	主 軸 機 能	2 けた (S00~99)
12	工 具 機 能	2 けた (T00~99)
13	工 具 位 置 補 正	10 組, T 指令による
14	バ ッ ク ラ ッ シ ュ 補 正	0~100 パルス, 各軸
15	シ ー ケ ン ス 番 号 機 能	4 けた
16	手 動 デ ー タ 入 力	テープ指令と同一指令入力可
17	フ ィ ー ド レ ー ト オーバライド	0~100%, 10% ステップ
18	原 点 復 帰	1 軸ごと各軸
19	手 動 送 り	連続および 1 パルス送り
20	シ ン グ ル ブ ロ ッ ク	あり
21	ブ ロ ッ ク 停 止	あり
22	フ ィ ー ド ホ ー ル ド	あり
23	ブ ロ ッ ク デ リ ー ト	あり
24	リ フ ァ レ ン ス ブ ロ ッ ク	あり
25	マ シ ン ロ ッ ク	あり
26	非 常 停 止	あり
27	表 示 機 能	現在値, 1 軸ごと各軸 テープ指令値 手動データ入力値 工具補正値

(2) MAINプログラム

補間計算の前準備を行なうプログラムと MCU, あるいは機械操作

盤の押しボタンスイッチ（サイクルスタート、フィードホールド等）に対応する処理を行なうプログラムである。

(3) MOTION プログラム

直線補間および円弧補間計算を実行するプログラムで指令直線（円弧）を微小直線素子に分割、各軸方向の成分を求めてNCインタフェースに出力する。手動送り、原点復帰の処理もこのプログラムで行なう。

(4) DISPLAY プログラム

操作パネルのスイッチによって選択された表示ワードをコアから選び、操作パネルの表示装置に出力するプログラムである。

3. 1. 3 機能

表 3. 1 に機能の一覧表を示す。NC 機能は従来の個別 NC と基本的には同じである。これらの機能の中でフィードレートオーバーライドを除いてすべてソフトウェアがその機能の一部を分担している。ミニコンを用いたことによる特長としては特に表示機能が拡充され、操作に伴うデータの確認を現場で簡単に行なうことである。

3. 2 ミニコンによる複数台制御

ミニコンによる工作機械の制御の次のステップとして、複数台制御への拡張がある。複数台機械の制御方式は、計算機をデータバンクとして、NC 工作機械群を制御する DNC 方式と、計算機に従来の NC 機能を持たせたソフトウェアロジック NC による CNC 方式とがある。当所では、経済的な複数台制御システムの一つとして、後者の方式の開発を行なっている。

図 3. 3 は NC 機能と組立機制御を CNC 方式で複数台制御した場合の装置である。このシステムでは、第一優先度を NC 機能に持たせ、

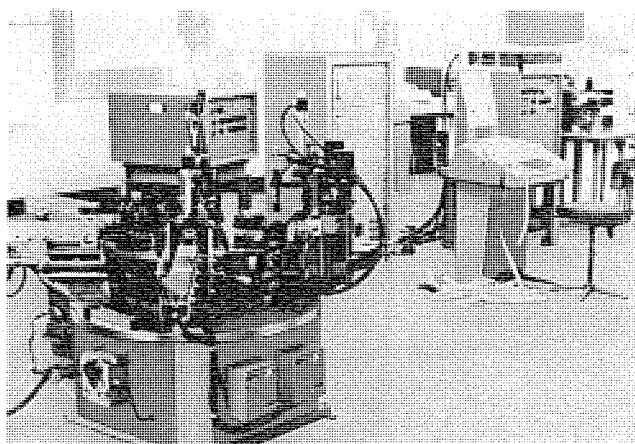


図 3. 3 ミニコンによる複数台制御の実験装置
(NC 機能と組立機制御)

Exterior view of test equipment for group control.

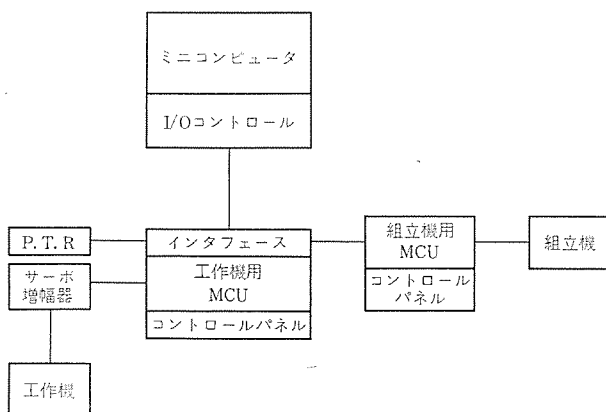


図 3. 4 複数台制御のブロック図
Block diagram of group control using CNC.

その空時間を利用して組立機の各種制御を行なうもので、制御機能はすべて計算機に持たせ、組立機用のマシンコントロールユニット (MCU) には、制御弁を駆動するリレーのみしかおかれていない。組立機は、図 3. 3 のごとく、マルチヘッドとターンテーブルを主体とし、割込用リミットスイッチ約 30 個を持っている。図 3. 4 にこの装置のブロック図を示す。

このように計算機を導入して、制御機能にフレキシビリティや計算能力を持たせることにより、異種工作機械群の複数台制御を効率よく行なうことができる。

4. 工業用ロボット

4. 1 概要

現在、工業用ロボットの用途はワークの機械への供給、コンベヤ間の搬送などのマテハン作業、あるいは溶接・塗装などの悪環境作業での活動である⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかし作業経路可変である工業用ロボットも前後装置として、ワークの定位置供給装置を必要とするなどの欠点指摘がなされている。このため、ロボットに適応性を持たせる目的で、ロボット用感覚器（視覚・触覚）の開発およびロボット群の計算機制御の研究が盛んに行なわれている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

当所においても、安価な視覚付きロボットおよびロボットの群制御方式の開発を目指した、ミニコンで制御した視覚付きマニピュレータと空圧式マニピュレータ群制御のモデル機を試作した。

4. 2 視覚付きマニピュレータ⁽¹⁷⁾

図 4. 1 に試作機の構成を示す。

マニピュレータはアームの上下、前後、旋回、ハンドの回転、開閉の 5 可動軸を有し、制御装置を介して、各軸への計算機からの位置指令

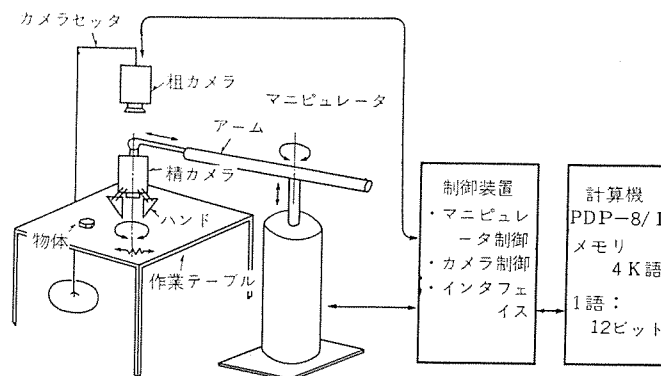


図 4. 1 視覚付きマニピュレータの構成
Configuration of manipulator with electronic eyes.

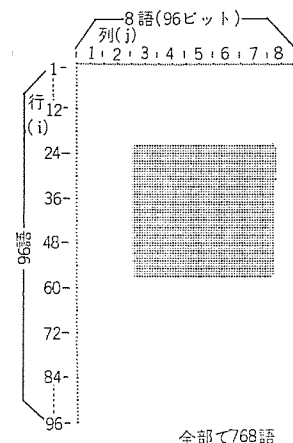


図 4. 2 映像信号の格納状態
Video signal stored in computer memory.

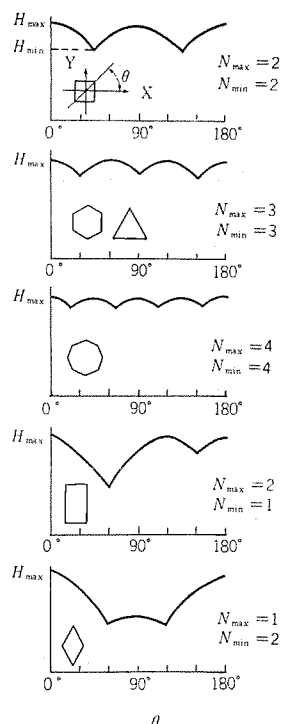


図 4.3 物体投影像曲線の例
Examples of model characteristic curves.

および現在位置の読み込みができるようになっている。また、作業テーブル上方に取付けたテーブル面 (500×500 mm²) を視野とする粗カメラと、ハンドに取付けた精カメラ (視野: テーブル面 100×100 mm²) の2個のTVカメラを持っており、切換えて使用する。

TVカメラからの映像信号はカメラ視野を96×96のメッシュ状に分割し、各部分の輝度から、テーブル面であれば“0”，物体面であれば“1”の2値信号に変換して、図4.2のように768語 (9,216ビット) の情報として、視野と対応させてコアメモリに読み込む。

視覚付きマニピュレータは次のようにして、物体位置探索と形状判別を行なう。

(1) 粗位置決め

粗カメラの映像信号から、テーブル上物体の概略位置を検出し、アームをその位置まで伸ばし、物体が精カメラの視野内に入るようにする。映像信号の直交座標系からアームの極座標系への変換が必要であるが、精カメラ視野内に物体の1部分が入ればよい特長を利用し、映像信号の列jに対して、それぞれ一次近似式で座標変換を行ない、プログラムステップの減少を計っている。

(2) 精位置決め

粗位置決め後、物体面中心と精カメラ中心を一致させる。精カメラ視野に視野中心を原点とする直交座標軸を設け、各象限内の物体面積から、アームの前後、旋回軸方向の面積差が許容内に入るまで、映像信号からのフィードバックを加えながらアームを位置決めする。

(3) 形状の判別

物体形状の判別は精カメラを180°まで回転させながら、物体のX軸方向の投影像の長さを測定すると、図4.3に示した物体図形特有の曲線が得られる。この曲線から、投影像の最大値 (H_{max})、最小値 (H_{min})、最大、最小値の数 (N_{max} , N_{min})、 H_{max} と H_{min} との角度差などの特長を抽出し、さらに面積も判定条件に加えて基準物体との合否を判別する。形状判別が完了すると物体の向きに応じてハンドを回転させ、下降すると物体をつかむことができ、所定

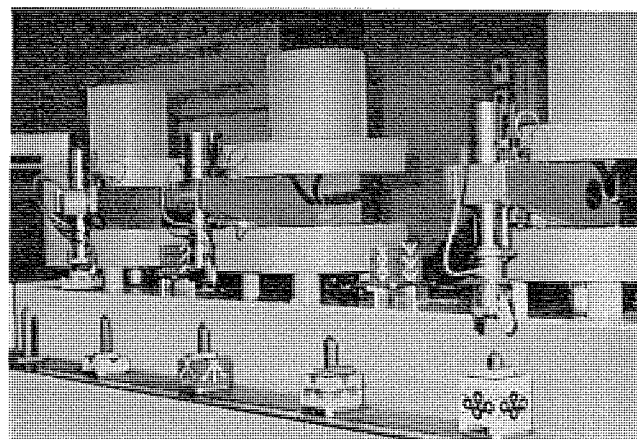


図 4.4 試作機外観
Group control of industrial robots.

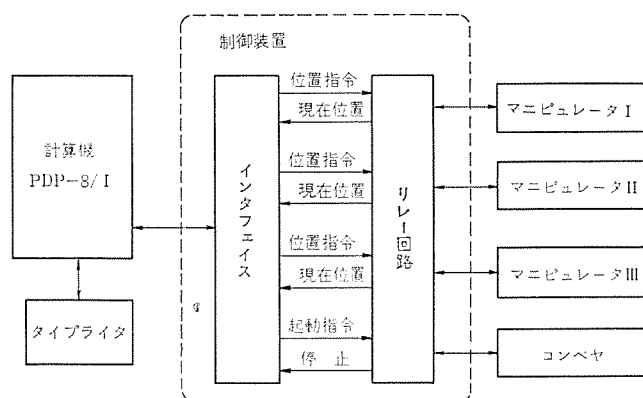


図 4.5 ハードウェア構成
Block diagram of control system for group control of industrial robots.

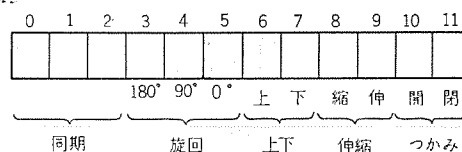


図 4.6 位置命令のビット割当 (1語)
Bit assignment of position instructions.

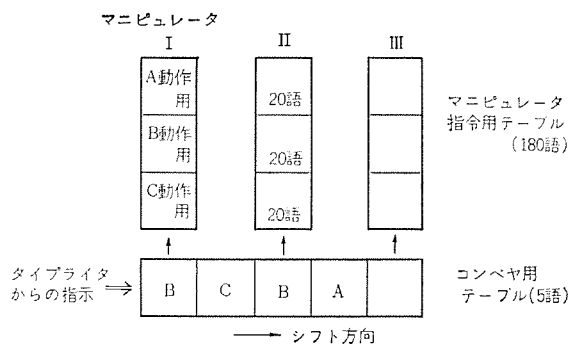


図 4.7 制御方法
Control method of manipulator.

位置へ運搬する。

以上の動作制御が約2k語のメモリで実現でき、かなりの物体形状の判別ができた。

4.3 マニピュレータの群制御⁽¹⁸⁾

図4.4に群制御モデル機の外観を、図4.5にそのハードウェア構成を示す。3台の空圧式マニピュレータによって、タイプライタからの指令

どおりの積み木をコンベヤ上に組み上げてゆく。

空圧式マニピュレータは、アーム旋回（3位置）、上下回転（2位置）、伸縮（2位置）とつかみの4可動軸を有し、各ストロークエンドはメカニカルストップで停止させる形式のもので、現在位置はリミットスイッチにより検出している。各マニピュレータには3カ所のストック(A),(B),(C)があり、ストックの選択によって積み木種類の変更を行なう。

各マニピュレータへの位置指令は1語のビットパターンとして与え（図4.6）、マニピュレータの現在位置信号と一致すると、つぎの位置指令を出す。

図4.7に制御方法を示す。マニピュレータ指令用とコンベヤ用のテーブルを持っている。タイプライタから組み上げ種類の指定があると、コンベヤ用テーブルの入力端へ積み木種類記号(A,B,C)が記入され、コンベヤの歩進と同期させて1ステップずつシフトさせる。指令用テーブルには、(A)のストックから積み木Aを取り出す位置指令シーケンスを保持しているA動作用と、(B),(C)から積み木を取り出すB,C動作用の制御データが格納されている。

コンベヤ用テーブルの内容に対応する動作を各マニピュレータに実行させ、3台の動作が完了するとコンベヤを歩進させるサイクルを繰返すことによって、指定の積み木を組み上げることができる。

以上の動作制御を約1.4k語のメモリで実現できた。またマニピュレータ制御台数の増加に対しては、1台あたり100語のメモリ増で可能である。このようなシステムは多種少量生産の自動組立ラインの概念モデルとして考えたもので、ミニコンを使用することによって数種類の製品の組立も容易に行なえることを示している。

5. NC 旋盤へのローディング装置

NC 工作機械の出現により加工の自動化は著しい発展を示した。さらに、これら工作機械を総合的に運営管理する群管理システムも逐次実現されている。

しかしながら、自動化をすすめていくためにはこれら機械の加工作業にともなう手作業、たとえば材料のチャッキング、切粉の処理、バイト交換、などの問題を解決しなければならない。われわれは、複数工作機械の総合管理を工場における生産システムのひとつの問題と考へて、材料の自動供給等の手作業を含め、さらに生産管理的な情報を提供するシステムの開発を行ない、その第1段階が完了した。

5.1 システムの概要

このシステムは、3台のNC旋盤を対象とした素材の自動供給、仕上材の自動搬出と分類格納、半仕上材の方向反転、等を1台のミニコンで制御する装置である。ミニコンは単に制御をするばかりでなく、システムに次のような機能をもたせている。

(1) システムの安全性を高める。

このシステムは、100kgをこえる大きな重量の素材、仕上材を扱うものであり、誤動作は人命にかかわる場合が多い。この点を重視し、ハード的なインタロックと合わせ、ソフト的にも安全対策を施している。

(2) 将来の発展性に適応できるシステムを形成する。

現在の段階では3台の旋盤に限定されているが、インタフェイスを増すことにより接続し得る台数を増加することができる。また、NCテープの作成は、そのままシステムとしてデバッグができ、さらに適当な判断機構を加えることによりバイトの自動交換等も可能となる。

(3) 管理情報のアウトプット

このシステムは素材、仕上材数を計数するカウンタをそなえており、

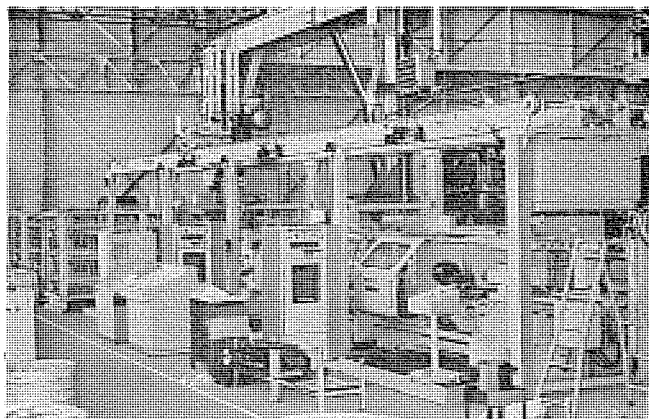


図 5.1 システム 全景
Automatic loading and unloading system for NC lathes.

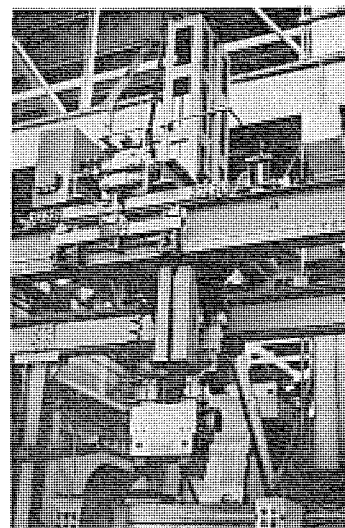


図 5.2 動作中のキャリア
Carrier for loading and unloading system.

表 5.1 システム 構成
System configuration.

NCLA ローディングシステム	機械系	素材ストック	1 台
		仕上材ストック	1 台
		キャリア	1 台
		旋盤	3 台
	制御系	ミニコン	1 台
		インタフェイス	1 式
		操作盤	3 台
		総合監視盤	1 台

員数をセツトすることにより自由に加工数を制御できる。これらの情報は関連部門にフィードバックされ、密度の高い管理ができる。

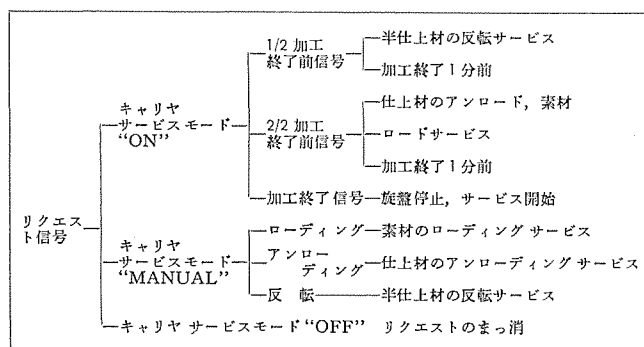
(4) 他のシステムとのオンラインの結合ができる。

計算機によって制御される他のシステムとの結合が可能であり、工場全体の総合的な運営管理を可能とする。

5.2 システム構成

システムの全景は図5.1および図5.2に示されており、その構成が表5.1に示されている。全景写真では左から順に、素材ストック、仕上材ストック、1号・2号・3号旋盤が配置され、上部にキャリアが見られる。素材ストックは素材の格納庫であり、各旋盤に対応して棚が設けられている。ストックとキャリアの間の材料の受け渡しは受台が行なう。キャリアは、素材・仕上材の搬送機であるとともに、旋盤への材料の着脱も行なう。キャリアは、素材専用・仕上材専用の2本のアームをもっている。

表 5.2 リクエストとその内容
Contents of service.



仕上材用のアームは回転のできる構造になっており、前加工の終了した半仕上材を 180° 方向転換して後加工を可能にする。各アームの先端には単独に動作できる 2 個のツメを備え、鍛造品のような段付き構造の材料でもハンドリングできる構造になっている。各旋盤には個別操作盤が置かれ、旋盤の信号と制御系の接続をきりかえ、モード選択を行なう。また、システムのモニタとして総合操作監視盤が置かれ、ランプで動作状態を表示している。

5.3 制御内容

このシステムでは、旋盤 (NC 装置) からキャリアのサービスを要求するリクエストを出し、計算機が絶えず監視してそのリクエストを記憶し、安全を確認してサービスを開始する。リクエスト信号には 7 種類あり、そのリクエストに対応するサービス内容は次のとおりである。

これらのリクエストとサービスを計算機が制御するための情報として入力情報 96 点、出力情報 64 点を選び出した。機械的な動作の制御はビット対応を基本とし、たとえば、チャック開放の指令 1 点に対し完了の入力情報点が対応する。制御は、構成要素 (たとえば素材ストッカ、キャリア) ごとにデバイスナンバーをとり、ビット対応の動作をパターンで処理し完全なる動作をするべく工夫した。

5.4 今後の課題

現システムは第 1 段階を終わったところですでに工場運転に入っているが、今後の課題として本来の管理機能をもたせたコンピュータシステムとすべく下記の機能の拡張をはかる予定である。

- (1) キャリアサービスのスピードアップ
タイムシェアリングによる複数デバイスの動作。
- (2) システムモニタチェック
タイプライタの有効利用をはかる。
- (3) 最適制御、群管理の実現
最も合理的な配分による処理方法の開発
- (4) 管理情報、生産管理的機能の追加
計数管理による生産高表示等。

6. コンベヤ自動仕分

流通部門の合理化のひとつとして、仕分けの自動化・合理化がすすめられている。自動仕分装置に要求される仕様として、つぎのような点があげられる。

- (1) 処理スピードが早いこと。
- (2) 正確に仕分けられること。
- (3) 安いシステムであること。
- (4) 拡張性に富むシステムであること。

当所においては、総合システム部と協同できわめて拡張性に富む安

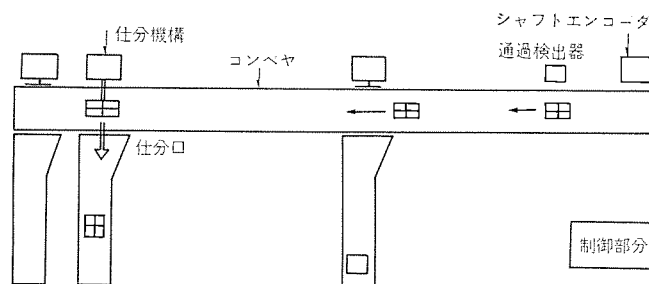


図 6.1 移動距離監視方式
Automatic sorting conveyor system.

表 6.1 システムの仕様と構成
Specification of automatic sorting conveyor system.

仕 様	仕 分 口 数	60 ヶ所
	コンベヤスピード	20~50 m/min
	位置分解能	3,000 個/h
	処理能力	50 mm
構 成	MELMIC-101	プログラムメモリ 256 W スクラッチパッドメモリ 512 W 1 台
	MELMIC-124	入力 32 点、出力 16 点 4 台
	操 作 卓	操作ボタン 60 個
	通 過 検 出 器	光電スイッチ 1 台
	仕分口制御ソレノイド	60 個
	制 御 盤	MELMIC 用 きょう(筐)体ラック 表示盤 1 台

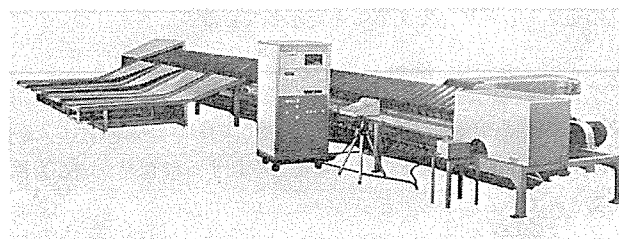


図 6.2 自動仕分装置全景
Exterior view of automatic sorting conveyor system.

価なシステムの開発に成功した。

6.1 MELMIC を用いた自動仕分装置

ここに紹介する装置は、超小形の制御装置 MELMIC-100 を用いた移動距離監視方式の仕分装置である。

移動距離監視方式とは図 6.1 に示されるごとく、コンベヤ駆動軸に結合したシャフトエンコーダ、距離測定の基準点に配置された仕分物通過検出器、各仕分口の仕分機構を制御するソレノイド、仕分先情報をインプットする操作卓、および制御部分から構成される。シャフトエンコーダは駆動軸の回転角に比例したカウント値をアウトプットする。したがって、仕分物が通過した瞬間のカウント値に、基準点から仕分口までの距離に相当するカウント値を加えれば、仕分物が搬出されるべきカウント値が求まる。制御系は、たえずカウント値を監視し計算値との一致で仕分口を制御する。この方式は次のような利点をもっている。

- (1) 仕分ミスが少ない

仕分物とコンベヤの間にスレの生じない限り、位置のトラッキングは正確にできる。

- (2) 構成要素が少ない

わずかの構成要素であり、安価なシステムを提供する。

- (3) 従来のシステムへの適用が容易である

コンベヤへの結合部品が少なく、小さな追加で可能となる。

(4) 拡張性に富む

システムが大きくなっても仕分口制御ソレノイドの追加のみで可能。

この方式に当社製超小形制御装置 M-100 を適用して経済的なシステムとして開発した。このシステムは、拡張のもとになる基本システムであり、仕分先は人間が解読し操作卓からインプットする方式をとっている。このシステムの仕様と構成を表 6. 1 に、また全景を図 6. 2 に示す。

6. 2 今後の課題

このシステムを製作した結果、十分満足のいくものであることが実証された。今後の大きな課題として次の 2 点があげられる。

(1) 仕分先情報の記入・解読

より早い仕分装置の実現には機械的・電気的な仕分先の解読がなされなくてはならない。仕分物を統計的に分析し、大きさごとの合理的な記号化、解読装置を開発せぬかぎり、目的とするシステムごとの方式になるか、入口を複数個そなえた人手によるシステムにならざるを得ない。

(2) 記録の保存と管理データのアウトプット

現代においては、装置の制御をするのみではシステムとして完全と言いがたい。仕分けた結果を記録し、何らかの管理的な情報として関連部門へ提供してこそ自動仕分がなりたつ。この機能をはたすためには MELMIC の記憶容量を増加するか、ミニコンの使用を考えなくてはならない。

7. 自動試験システム

各種機器とくに制御装置あるいは電子装置の複雑化にともない、その試験に高度の技術と熟練を必要とする傾向にある。このため、ミニコンを導入した各種の自動試験システムが開発され、省力化に貢献するとともに、従来、人手では困難であった試験を可能にしつつある(19)(20)。

7. 1 ミニコン導入の効果

ミニコンにより、測定あるいは試験の条件の設定、試験結果による可否の判定、測定結果の記録および付属機器の制御などを行なう。自動試験システムにミニコンを導入することのおもな効果としては、

(a) 試験条件の設定、可否判定、試験データの記録と整理が自動化されるので省力化が達成される。

(b) 試験条件の選択、切り換えが高速ででき、きわめて短時間に多種多様な試験の実行が可能となるため、人手で行なう場合に比べ、程度の高い、きめの細かい試験を行なうことができる。

(c) 試験用プログラムさえ完成していれば、実際のオペレーションは熟練者でなくても十分であり、また個人差がでない。

(d) プログラムを変更することにより、多種多様な試験項目の変化に対応できる。

などがあげられる。

試験対象としては、デジタル集積回路、プリント板、電子装置の配線、シーケンス回路や電子計算機などの、おもにデジタル的な電気信号を中心としたものから、アナログ回路・通信機・モータ・変成器などアナログ電気信号だけではなく、回転数・温度・寸法・重さなどの物理量の測定を必要とするものなども含まれる。これらの試験条件の設定、試験結果の記録など以外に、被試験装置のハンドリングの制御、たとえば良否による仕分け先の制御、ベルトコンベヤの制御なども、同じミニコンによって行なうことができる。

以下、ミニコンを導入した自動試験システムのうち、おもにデジタル

回路を対象としたものを二つ紹介する。

7. 2 エレベータ群管理装置のシーケンス試験システム

複数台のエレベータを最適に運転する新しい群管理方式として、OS システム 700 が当社で開発されたが、この中心となる部分は、数百の入力信号から最適な運転指令を出す群管理装置と呼ばれる一種の専用計算機である。この部分は複雑な演算を高速で実行するために、従来のリレーに代わりすべて IC 化されている。したがって、人手では試験条件の設定と信号の検出にきわめて長時間を必要とする。そこでミニコンを導入した自動試験システムが開発された。

図 7. 1 に試験装置のハードウェア構成を示す。本質的には、デジタル回路の自動試験システムと同じであり、次の各部分より構成されている。

(1) 出力ユニット

被試験装置 (DUT) に 1,024 点までのデジタル信号を与えるもので、IC ロジックレベルの直流および単発パルスとリレーの接点の開閉の 3 種がある。

(2) 入力ユニット

DUT からの 1,024 点までのデジタル信号を取り込むためのもので、IC ロジックレベルと接点の開閉による信号を読み取る。

(3) タイマ機構

プログラムでプリセット可能な 16 ビットのカウンタで 0 になれば割り込みを起こす。カウンタ周期は 0.01, 0.1, 1.0 ミリ秒の切り換えが可能であ

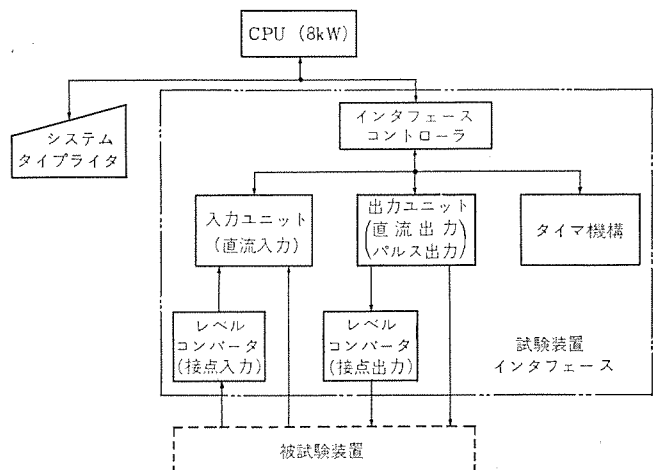


図 7. 1 試験装置のハードウェア構成
Block diagram of computer controlled test system for elevator supervisory control circuit.

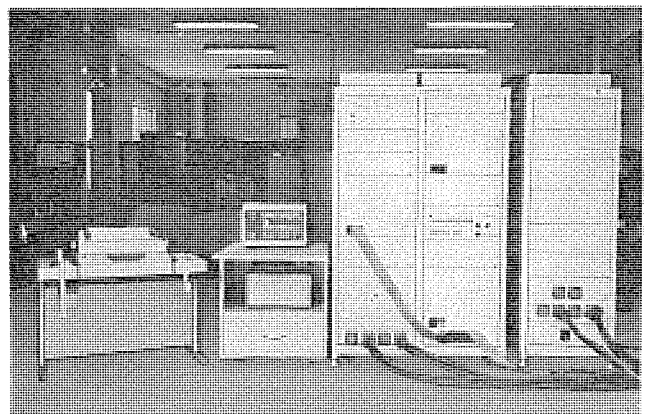


図 7. 2 試験装置の外観
Exterior view of automatic test system.

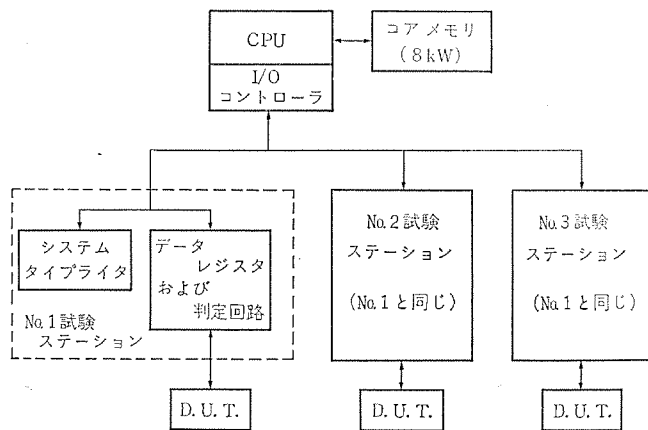


図 7.3 はん用シーケンス試験システムの構成
Block diagram of computer controlled test system
for sequence control circuits.

る。入出力信号間の時間遅れの測定などに使用され、管理プログラム(OS)により見かけ上、多数のカウンタの同時使用ができる。

(4) タイプライタ

試験プログラムを入れたり、人手による試験条件の設定、試験結果の表示などに用いられる。

(5) ミニコン本体

16ビット8k語でOSを常駐させる。

試験プログラムの作成を簡単にし効率をよくするため、シングルコンピュータタスクの可能な管理プログラム(OS)をメモリに常駐させているなど、ソフトウェアに重点を置いている。図7.2に試験装置の外観を示す。

7.3 はん用シーケンス自動試験システム

制御装置に使用されるデジタル回路を収容したプリント板、およびリレーで構成された制御装置の動作シーケンスの試験を目的として開発されたものである。試験システムの構成を図7.3に示す。基本的な動作は前述のシーケンス試験システムと同じであるが、用途別の複数台の試験ステーションを1台のミニコンで同時に多重処理している点が特長である。動作速度の早いプリント板関係の試験ステーションをミニコンの近くに配置し、リレー制御盤の試験ステーションは工場の関係で、本体から数百mはなれて設置される。

8. む す び

省力化・自動化機器の制御にミニコンを応用した事例について述べた。この分野におけるミニコンの応用は今後急増し、ミニコンは単に制御のための部品(システムコンポーネント)として取扱われる時代がくるであろう。そして、機械単体だけではなく、製造工程さらには生産システムとしての自動化・最適化のために、ミニコンを端末として上位のコンピュータと結合し、総合的な管理を行なう方向に進むことが予想さ

れる。

単に、生産性・経済性を追求するだけではなく、自動化により均質な製品、より高い性能の製品を供給するとともに、単純作業から人間を解放し、創造的な仕事へ指向する意味において生産システムへのコンピュータの応用は、人間性回復がさげられる1970年代の重要な研究課題の一つであろう。(昭和47-7-31受付)

参 考 文 献

- (1) 研野：オートマトンとシーケンス制御，制御工学，14，No. 9，34 (昭45-9)
- (2) Survey of Small Computers, Instrum. Control System, 44, No. 3, 101 (Mar., 1971)
- (3) R. K. Jurgen: Minicomputer Applications in the Seventies, IEEE, SPECTRUM, 7, No. 8, 38 (Mar., 1970)
- (4) 隅元：わが国におけるミニコンピュータの使用状況について，電子工業月報，14，No. 2，1 (昭47-2)
- (5) 菰原：加工・組立自動化の動向，三菱電機技報，45，No. 10，1,337 (昭46-10)
- (6) 生産ラインにおける省力化の現状と動向，日本電子工業振興協会，47-A-58 (昭47-3)
- (7) 寺尾：オートメーション技術の発展，電子通信学会誌，54，No. 11，1,491 (昭46-11)
- (8) 宮崎：工業計測，計測と制御，11，No. 1，30 (昭47-1)
- (9) R. Temple: The Application of Minicomputers to Manufacturing, 機械振興協会セミナー，大阪 (昭46-7)
- (10) C. H. Wick: Machinery, 3, 53 (1971)
- (11) P. G. Mesniaeff: Control Engineering, 3, 65 (1971)
- (12) C. J. Charnley: 12th International M. T. D. R. Conference
- (13) Proceedings of First National Symposium on Industrial Robots, IITRI (Apr., 1970)
- (14) 野田 監修：産業ロボット導入ガイドブック，オーム社 (昭46)
- (15) 井上：ロボットによる組立作業，精密機械，38，No. 1，102 (昭46-1)
- (16) 後藤：人工知能ロボットによる組立作業，ibid, 109
- (17) 壺井，ほか：手先に視覚をもったロボットによる物体位置および形状判別の一方法，信学会研究会資料，No. EC 72-6 (昭47-5-22)
- (18) 壺井，ほか：産業用ロボットの群制御，昭47信学会全国大会予稿，136 (昭47-4)
- (19) Joint Conference on Automatic Test Systems, I. E. R. E. Conference Proceedings, No. 17 (Apr., 1970)
- (20) Symposium on Automated Support Systems for Advanced Maintainability, ASSC '70 Record, 70 C 52-AES, IEEE Trans., Aerospace and Electronic Systems (Oct., 1970)

電着絶縁方式 MEDIS の開発

柴山 恭一*・佐藤 文彦**

小野 博***・地大 英毅***

Development of Electro-deposition Insulating System "MEDIS"

Manufacturing Development Laboratory Kyoichi SHIBAYAMA・Fumihico SATO

Central Research Laboratory Hiroshi ONO・Eiki JIDAI

A unique insulating process has been developed based on electro-deposition through water dispersion of insoluble polymer particles. Features of Mitsubishi Electro Deposition Insulating System (MEDIS) are superior to ordinary electro-deposition coating in the points of a very fast deposition rate and a larger film thickness. Application of MEDIS is in progress along two lines; one is to magnet wire production and the other to thick film insulation to the extent of 200~300 μ to be used for miscellaneous purposes.

Advantages of MEDIS are :

1. Uniformity of film thickness
2. Reduced heat cost
3. Ease and economy in operation because of die dispensed with for enameling.
4. No air pollution

The application will broaden with the development of new materials.

1. ま え が き

自動車工業などで実用化されている電着塗装法を、絶縁皮膜の製造にも適用しようとする研究は、国の内外で盛んに進められているが、現在行なわれている電着塗装法では、電着ワニスに各種の充てん(填)剤を添加しないかぎり、絶縁皮膜としての必要な膜厚が得られない、皮膜形成の速度が遅い、皮膜の特性が、絶縁体としては電気的にも物理的にも不十分である、などの問題があってほとんど実用化には至っていなかった。特にエナメル電線では製造上高速造膜性が要求されるほか、性能的には電気的特性はもちろん可とう性、耐摩耗性および密着性などの機械的特性が重視されることもあって、電着絶縁方式による製造法が不可能とされていた。

今回開発された MEDIS は、これらの多くの問題を解決した画期的な電着絶縁方式である。この製造方法において最も基本的な原理は、

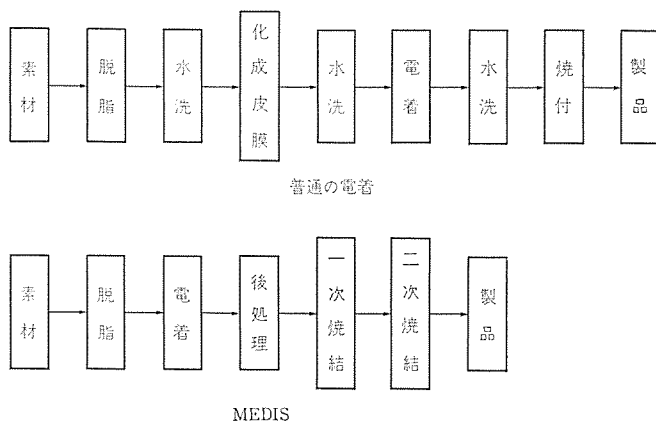


図 1.1 MEDIS と一般の電着塗装法の製造工程の
ブロックダイアグラム
Block-diagram of MEDIS process and conventional
electro-deposition coating.

(1) 水媒体に分散させた高分子コロイド粒子に特殊な処理を施して、厚膜のしかも均一な電着を得るためのエマルジョンワニス。

(2) 導体に電着析出した合成樹脂が焼付工程中に、亀裂が発生することを防ぐための特殊な後処理。

の2点があげられる。MEDIS と一般の電着塗装法の製造工程上の違いを、図 1.1 のブロックダイアグラムに示した。最も大きな差異は、MEDIS が後処理および二段焼付を必要とする点で、このことによって一回の塗布で絶縁に必要な厚膜の形成が可能になっている。この MEDIS は一般の電着塗装以外の塗装方法、たとえば静電塗装・粉体塗装などと比較しても幾多の利点があり、将来性が大きいと考えられる。

2. 製造プロセス

2.1 前処理

電着塗装は被塗装物自体が電極になることから、他の塗装法と比較してとくに前処理の影響を受けやすい。一般にりん酸亜鉛処理とりん酸鉄処理などの化成処理が必要とされているが、MEDIS では脱脂処理を主体とした前処理で十分と考えられており、大がかりな前処理装置や水切乾燥装置は必要としない。酸で前処理した場合は、十分水洗をしなければならないのももちろんである。

2.2 電着

電着理論と電着塗装については今までに多くの文献があり、電気泳動現象などに関する詳しい理論については、専門書⁽¹⁾にゆだねるとしてごく簡単に説明する。

電着とは、水溶解形ワニスまたは水分分散形ワニスから、一方の電極上に樹脂を凝固析出させることで、一般に直流電流が使用される。析出機構は、ワニスのタイプに関係なく次の四つの現象が同時に起きていると考えられている。

- (1) 電気泳動現象
- (2) 電気浸透現象

(3) 電気凝固現象

(4) 電気分解現象

電気泳動現象は、懸濁した細かい粒子やコロイドが電場のもとで移動する現象で、分散媒である液体（電着塗装の場合は水）が静止し、コロイド粒子が移動する。コロイド粒子の泳動も本質的にはイオン泳動と同じで、その電気泳動速度 μ は式(2.1)で表わされる⁽²⁾。

$$\mu = \frac{E\epsilon\zeta}{4\pi\eta} \cdot f(ka \cdot \zeta) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、

$1/k$: 二重層イオンふん囲気の半径

a : 粒子半径

ζ : コロイド粒子表面の ζ 電位

η : 溶媒の粘性

E : 電界強度

Debyeによればコロイド粒子が球形粒子で、かつ電気二重層の厚さが粒径に対して無視しうるとき、式(2.1)は近似的に次式で与えられるとしている。

$$\mu = \frac{E\epsilon\zeta}{6\pi\eta} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

電気浸透現象は電気泳動と対称的で、電気泳動が、荷電粒子が移動可能なため起こるのに対し、電気浸透は、液体の移動が可能なために起こり、両者ともまったく同一な現象である。

電気凝固現象については複雑な陽極反応を含み、定説となった理論は確立されていない。電気分解現象は、陰陽両極上のガスの発泡(泡)から容易に水の電気分解が行なわれていることが想像される。

MEDISでも前述の四つの現象が同時に起こり、被電着物に樹脂が析出されることは同様であるが、その特長について以下にのべる。

一般の電着塗装法の電着電圧が高電圧を必要とするに比べ、MEDISでは、水分分散系コロイドの粒子の大きさが $0.02 \sim 0.1 \mu$ もあること、特殊な処理を施していることなどにより、低電圧でも析出速度が速く、しかも厚膜の電着が可能である。各種実験した範囲内では、陽極(被電着物)と陰極の極間が3cm程度の場合、 $0 \sim 0.1$ V(電界強度にして 0.3 V/cm程度)まではほとんど析出されず、陰極近傍で、ガスが発生するだけにとどまることが知られている。電界強度が 2 V/cm以上になると、膜厚(樹脂析出量)は電着電圧に比例する。この現象は、電着時間の長短に関係なく常に成立する。すなわち電界強度がある値以上になると、一般の電着塗装に見られる、通電開始から樹脂析出が確認されるまでに有限の臨界時間が存在する現象⁽³⁾⁽⁴⁾は、MEDISに関しては認められていない。概略して述べれば、電着時間と膜厚(樹脂析出量)に関しては、定電圧(電界強度が 2 V/cm以上)で電着した場合、電着時間に比例すると考えてよい。もちろんパルス電圧でも、尖頭電圧、パルス幅とパルス数に比例することが実証されている。

一般の電着塗装では析出塗膜の塗膜抵抗が大きく、電氣的しゃへいが生ずるのと比較して、MEDISでは、仕上り皮膜が 500μ 程度になっても、析出塗膜による電氣的しゃへいが生じないという利点がある。これらの関係を図2.1、2.2に示す。MEDISは析出層の電氣的しゃへいが生じないため、電着電圧・クーロン効率などの値が1けたほど違っている。詳細は表2.1にあげている。

コロイド粒子が電気泳動するとき、分散媒(水)を随伴し析出層内かなりの水分が含まれている。この析出層内の含水率は電着条件に左右されるが、この含水率が、皮膜の外観および皮膜特性に大き

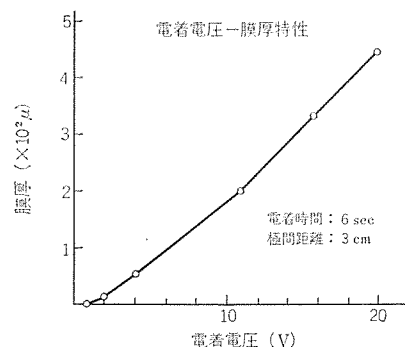


図 2.1 電着電圧に対する析出皮膜厚
Film thickness vs. ED voltage.

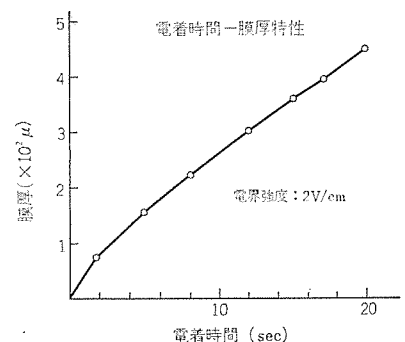


図 2.2 電着時間に対する析出皮膜厚
Film thickness vs. ED time.

表 2.1 MEDIS と一般の電着塗装との比較
Comparison between MEDIS and ordinary ED coating.

	MEDIS	一般の電着塗装
電着電圧 (V)	0	100~250
電流密度 (A/dm ²)	1	0.2~1
電着割合 (μ/s)	25	~1
クーロン効率 (mg/c)	300	30~50
最大膜厚 (μ)	300	30

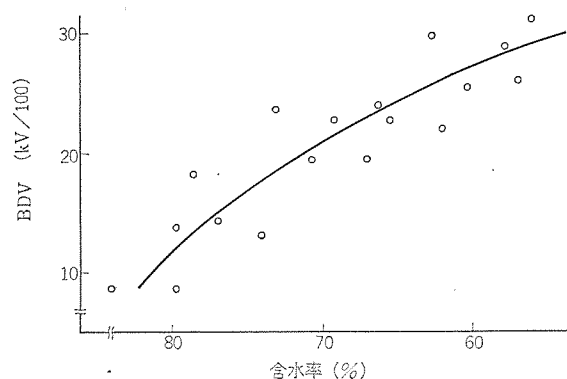
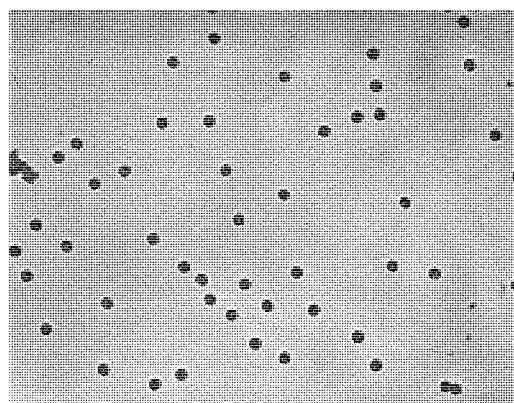
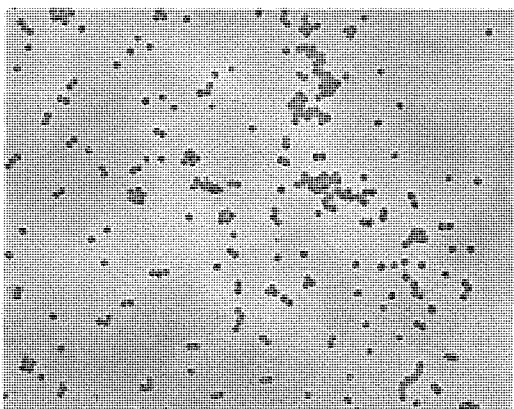


図 2.3 含水率に対する破壊電圧特性
Break-down voltage vs. water content (%) in ED layer.

な影響を及ぼす。コロイド粒子が泳動するとき随伴する水の量は、電界強度に無関係すなわち slipping planeが電界強度により圧縮されたりはしないので、含水率は、電気浸透現象による析出層内の排水に関係していると思われる。この排水が電着条件により大きく左右されるらしい。図2.3は含水率に対する皮膜の絶縁破壊電圧の依存性を示したもので、析出層内の含水率が多いと、破壊電圧が悪くなることが明白である。上記のごとく電着条件により、皮膜の性能が左右されるので、最適条件を見出す必要があることは言うまでも



倍率 × 10⁴



倍率 × 10⁴

図 2.4 MEDIS ワニスのコロイド粒子の電子顕微鏡写真
Electron micrograph of colloid particle of MEDIS varnish.

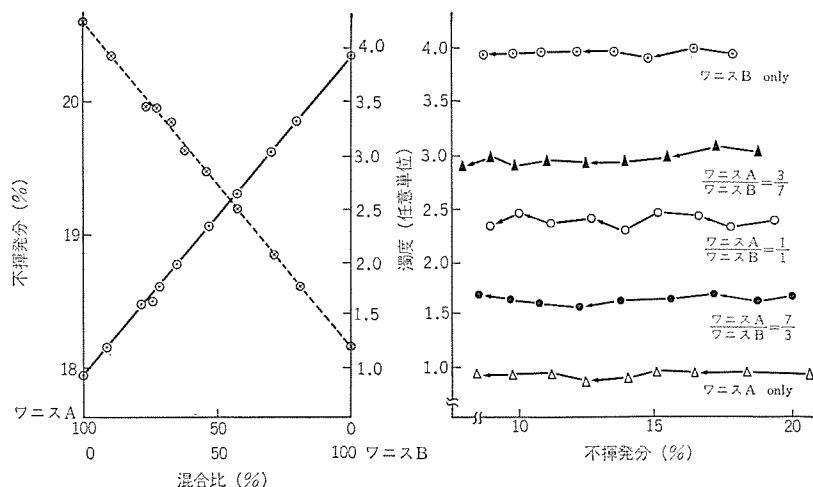
ないが、皮膜性能は、電着塗装法にかぎらずいかなる塗装法でも使用する材料の特性に支配される度が多い。ところが一方絶縁皮膜の性能に対する要求は、近年ますます過酷でしかも使用目的も多種多岐にわたり、多面的な性能が要求される。この要求を満足するためには、単一ワニスの塗布では不可能に近く、これを可能たらしめるにはあらかじめ二種以上のワニスの混合、またはワニスにマイカなどの無機物の粉体の混入などの複合塗装方法が考えられる。

MEDIS ワニスのコロイド粒子は、ほぼ球形(図 2.4 を参照のこと)と考えられるので式(2.2)が適用できる。この式から単一コロイド系では、粒子の大きさに関係なく泳動速度は同じと考えられている。同じ組成のワニスでも製造ロットの異なったワニス、および異種ワニスの混合では、それぞれのワニスコロイド粒子のζ電位が異なることが普通で、泳動速度の違いにより電着皮膜の組成が、時間に依存するという可能性が生じてくる。そこで泳動速度が異なったコロイド系のワニスを混合し、その泳動速度の違いが工業的にどの程度影響するか、実際に電着して希釈させた残存液の濁度測定によって検討した。濁度とコロイド粒子の関係は Rayleigh や Debye⁽⁵⁾ によって理論的に求められている。コロイド系では安定性などで濁度変化を調べることも多いので簡単に説明しておく。

MEDIS ワニスのようなコロイド系が光が通過する際に、入射光の強度を I_0 、厚さ l だけ通過した透過光の強度を I_t とし、コロイド系の濁度を τ とすれば

$$I_t = I_0 \exp(-\tau l) \quad (2.3)$$

となる。コロイド系の濁度は単位容積中に含まれるコロイド粒子に比



(a) 混合比率に対する不揮発分と濁度特性 (b) 混合ワニスの電着劣化による不揮発分と濁度特性

図 2.5 ワニス A とワニス B の混合ワニスの不揮発分との濁度特性の関係
Turbidity vs. solid content in blend varnish of type A and type B.

表 2.2 ワニス A とワニス B の泳動速度
Electro-phoretic velocity of type A and type B varnish.

ワニスの種類	泳動速度 (cm ² /Volt·s)
ワニス A	4.8×10^{-4}
ワニス B	6.2×10^{-4}
ワニス A = 1 / ワニス B = 1	5.8×10^{-4}

例するが、実験的にはコロイド粒子の数 N よりも濃度 C を用いたほうが便利である。粒子の数 N は濃度 C に比例するから、 (τ/C) を用い、これを比濁度といっている。実際には無限希釈における比濁度 $(\tau/C)_0$ を求め、粒子の大きさや分子量を定める。粒子の大きさと濁度の関係は次式によって示される。

$$\tau = AN\bar{V}^2 \quad (2.4)$$

ここに、 A : 光学定数

N : 粒子数

\bar{V} : 平均粒子体積

単位容積中では $N\bar{V}$ は体積濃度 C であるから、

$$\frac{\tau}{C} = A\bar{V} \quad (2.5)$$

となり比濁度はコロイド粒子の体積に比例することになる。以上のごとく異種ワニスのコロイド粒子の泳動速度が異なれば、ワニスを混合し長時間電着すれば、その残存ワニスの濁度は初期値のそれと違ってははずである。泳動速度の異なったワニス A とワニス B と混合し、電着して希釈させた残存液の濁度測定の結果は図 2.5 に示したが、混合比に全く関係なく濁度は初期値からほぼ一定値を示していることから、電着析出層の組成は混合比と同じであると解釈される。ここで用いたワニス A とワニス B だけでなく、他のワニスの混合も工業上全く問題がないことが判明している。なおワニス A、ワニス B およびワニス A とワニス B の混合液の泳動速度は、表 2.2 のとおりである。泳動速度の測定は界面移動法を採用した。

2.3 電着ワニスの管理

MEDIS ワニスに限らず電着塗料は塗装が進むにつれて、電着浴中で変化していく、これらの変化はおもに電着時における陽極金属の溶出、ワニス中に浮遊する荷電粒子の電着析出による不揮発分の濃度変化、被電着物により持ち込まれる不純物による汚染などが起因している。これらの変化が電着析出に影響し、その結果皮膜性能が

大きく左右される。したがって連続的に電着する場合、ワニス浴を電着開始頭初から一定の状態を維持していく管理が、必要になってくる。これまでの経験では、浴そう内のワニスの液特性が電着により大きく変化すると、電着析出皮膜が電着開始初期の特性を示さなくなる限界があり、それ以上使用していくと、皮膜の外観および絶縁性能が低下することが知られている。MEDIS を実用化するにあたっては、これらの使用したワニスを何らかの方法で、初期と同じ皮膜に還元させることが必要になってくる。ワニスを劣化させる要因としては、前にも少し述べたが pH 値の上昇、不揮発分の低下それに伴う荷電粒子の減少、電極金属イオンの溶出による比抵抗の変化が掲げられる。これらの因子を還元させる方法として、pH 値および比抵抗に関しては、イオン交換樹脂法・電気浸透法・逆浸透法などの脱イオン法が考えられる。ワニスの濃縮については蒸発法・減圧法・噴霧法など種々考えられる。実際に用いられている方法は pH 値、比抵抗の回生はイオン交換樹脂法であり、濃縮は蒸発法である。

イオン交換樹脂を適当に選べば pH 値・比抵抗は完全に還元する。被電着皮膜の外観、絶縁皮膜特性を良好な状態で継続させるためのワニス管理は、イオン交換樹脂量、ワニスの流量、イオン交換樹脂の再生時期を十分考慮することが必要である。濃縮に蒸発法を採用する場合、ふん囲気、特に温度と湿度に左右される。電着析出の持出し量だけ濃縮しないと浴中の不揮発分量が変化し、電着条件を濃度の変動に従ってコントロールしなければならなくなる。濃縮工程中でワニスのコロイド粒子が凝集し、巨大粒子が発生する可能性は濁度測定からも、また電子顕微鏡写真の粒度分布測定などの方法でも検討されている。回生ワニスを使用した電着絶縁皮膜の特性は、電着開始頭初のもそれとかなり見劣りがしないことから、理論的にはワニス全部を使用し得ることになり、ワニス使用効率は非常に高いと考えてよい。

2.4 皮膜形成

MEDIC が今日実用化されるに至ったのは、電着後の後処理方法の賜といっても過言ではない⁽⁶⁾。通常の電着塗装法では電着析出層が薄いこともあって、特別な後処理を施さず、被電着物表面に付着している持出し塗料を水洗によって洗い流す程度であるが、MEDIS では析出層が厚いこと、電着ワニス在水分散形コロイド粒子のため析出層の粒子間引力が微弱なことがおもな原因で、皮膜が加熱硬化時に亀裂を起す。この皮膜の亀裂を防ぎ均一な皮膜を形成させるためには、析出層の粒子間の相互融着を促進させる凝結剤の施与が必要になってくる。ワニスの種類がかわれば凝結剤の粒子に対する溶解度が異なるので、最適凝結剤を選択しなければならない。量産化するに際しては、コスト・安全衛生面などに十分配慮して凝結剤が選択される。

加熱硬化の是非が皮膜の外観・絶縁性能を左右するが、おもに昇温速度が皮膜の外観に、加熱温度と加熱時間が絶縁性能、特に可とう性・耐摩耗性・クレージグ性や巻付性などの機械的特性に影響する。昇温速度が速すぎれば、析出層内の水分が蒸発する前に表面の硬化が始まり、水分の逃散口がなくなり発ぼう(泡)する。最も確実な発ぼうの防止方法は加熱硬化を二段に分けることで、常識的に考えれば、初めの一次焼結温度は水の沸点以下に保ち、二次焼結で皮膜を形成するに必要な温度を与えることである。加熱硬化の最適条件は経験的に定められる要素が多い。

3. MEDIS 材料

3.1 MEDIS ワニスと一般電着用ワニスの比較

電着用塗料は、皮膜形成用高分子物質が水中に分子状で溶解した水溶性型のものと、水中に微粒子として分散したいわゆるディスパーション型のものの2種類に大別される。前者は一般に分子数が1,000以下の樹脂が用いられており、この型の塗料は“つきまわり性”がすぐれており、複雑な形状の物体にも容易に均一な皮膜を形成するという利点があるが、厚膜を得るのは困難で30μmが限度である。またこの水溶性塗料は、樹脂骨格中にカルボキシル基・水酸基・アミノ基・スルホン基・ポリオキシエチレン結合などの親水基を導入するか、あるいはカルボキシル基などの塩を作って水溶化する方法によって作られているので、得られた樹脂皮膜は電気絶縁性が劣るという欠点がある。

一方 MEDIS プロセスで用いられる材料は、すべて後者のディスパーション型のものに属している。この型では分子量が数十万に及ぶ高分子物質を用いることができるので、機械的性質・耐久性・耐薬品性などのすぐれた皮膜をつくることのできる。この分散形ではつきまわり性はあまり良くないが、膜厚0.5mm程度の厚膜の被覆を容易に得ることができるので、前述の皮膜の耐水性・耐久性・機械的性質などを考え合えると、電気絶縁用としては水溶性型よりもはるかにすぐれているということができる。

3.2 MEDIS ワニスの種類と特性

現在実用化され、採算ベースにのっているのはB種クラスのエポキシアクリル系のワニスであるが、実験室段階を経て実用化を検討中のもの、量産化を検討中のもの、研究開発途上のものとしては多種類のワニスがあり、これらのワニスを製造方法によって分類すると表3.1のようになる。

まず乳化重合法は、得られるワニスの粒子径が均一なこと、ワニスの長期保存安定性が良好であること、などの特長があり、欠点としては、使用しうる原料が限定されるために性能面で制約があり、特殊なものを除けば一般には耐熱クラスB種程度のものしか得られない。この型のワニスは、界面活性剤の存在下で水中でビニルモノマーを重合させて得られるが、使用されるモノマーとしては、スチレン、アクリロニトリル、メタクリル酸メチル、酢酸ビニル、アクリル酸エチル、メタクリル酸、グリニールメタクリレートなどが代表的なものとしてあげられる。乳化重合系に属する特殊なものとしてふっ(弗)素樹脂系水分散ワニスがあるが、これは四ふっ化エチレンあるいは四ふっ化エチレン-六ふっ化ブ

表 3.1 MEDIS ワニスの製造方法と特長
Preparation method of MEDIS varnish.

製造方法	分散系の特長	適用される樹脂	耐熱性
乳化重合法	粒径が均一 安定性が良好 品種の限定	アクリル系 アクリルエポキシ系 テフロン	E~B種 H種
化学的分散法	性能の幅が大きい 粒径が不均一 やや不安定	ポリエステル エポキシ ポリエステルイミド ポリアミドイミド ポリイミド	B~H種
物理的分散法 (機械的分散法)	適用範囲が広い 粒径が大きい 安定性が乏しい	多品種	B~H種
界面重合法	安定性が良好 品種の限定	ポリウレタン ポリエステルイミド ポリエステル	B~H種

ロビン 共重合体と、ビニルモノマーを共重合させて得られるH種ワニスである。

化学的分散法は、粒径の分布が不均一なこと、ワニスの長期安定性がわるいという欠点があるが、適用範囲が広いので用途に応じていろいろの性能のものを作ることができる。安定性の問題は、製造方法や樹脂の変性などによってかなり改善できるので十分実用可能な方法である。この型のワニスは、主として縮合反応によって作られる樹脂を特殊な方法で水に分散させて得られるが、適用しうる樹脂としてはポリエステル、エポキシ、ポリエステルイミド、ポリアミドイミド、ポリイミド、ポリエステルアミドイミドなどがあげられ、水分散型に持込んだことによる性能面のマイナスはほとんど認められないので、非常に有力な製造方法の一つであると考えられる。

物理的（機械的）分散法は、乳化重合法で作られる樹脂以外のほとんどあらゆる樹脂、たとえばホルマル、ポリエステル、ポリエステルイミド、ポリエステルアミドイミド、ポリアミドイミド、エポキシ、ポリウレタン、ポリイミド、ポリヒダントインなどに広く適用しうるという利点はあるが、他の方法にくらべてワニスの粒径がかなり大きく安定性が良くないこと、溶剤を併用することによる安全衛生上の問題、量産化の際の装置の問題などの短所があり、現在のところ実用化の段階には達していない。

最後の界面重合法は、ポリウレタン、ポリエステルアミド、ポリアミド、ポリエステル、ポリエステルイミドなどに適用されるが、ある程度品種が限定され、また製造技術・コストの面でも幾分むずかしい問題があり、実用段階には達していないが、将来は非常に有望な方法であると考えられる。

4. MEDIS 絶縁皮膜特性

MEDIS は、高分子化学の進歩にともなって各種の合成樹脂の適用が可能になると思われるが、実機に使用され約1年以上の実績がある電線について主としてのべる。現在量産されている電線は、B種のエポキシアクリル系樹脂エナメル電線である。顧客の用途に応じられるように数種開発してきたが、その最も代表的なワニスAのMEDIS電線について、ホルマル線ならびにポリエステル線と電線性能を比較してみた。その一般特性は表4.1に示してある。特筆されることは、通常のエナメル電線の偏肉比率が大きいのに比べMEDIS電線はほ

表 4.1 従来の電線と MEDIS 電線（アクリル-エポキシ系）の性能比較

Comparison between the properties of MEDIS (Epoxy-Acryl) and those of conventional wires.

試 験 項 目		MEDIS (ワニスA)	PVF	PEW
構 造	仕上外径 (mm)	1.100	1.100	1.100
	導 体 径 (mm)	1.000	1.000	1.000
偏 肉 比 ビ ン ホ ー ル (=5 m) 巻 付 性		1.10	1.45	1.38
		0	0	0
耐 摩 耗 性	J I S 式 (回)	55	72	55
	NEMA式 (g)	2050	2200	1690
絶 縁 破 壊 電 圧 (kV)		11.0	10.5	11.2
熱 軟 化 温 度 (°C)		300	260	290
ヒート ショック	150°C	自己径合格	自己径合格	自己径合格
	180°C	自己径合格	自己径合格	3倍径合格
	200°C	2倍径合格	自己径合格	4倍径合格
耐 ベ ン ザ ー ル 性		合 格	合 格	合 格
耐 薬 品 性 25°C, 24 h	硫 酸 (比重 12)	合 格	合 格	合 格
	カ性ソーダ 2%	合 格	合 格	合 格
	カ性ソーダ 10%	軟 化	合 格	皮膜ハクリ

とんど偏肉がない。space factor を問題にするところでは多いに有利になると思われる。IEEE No. 57 法による電線単体の耐熱寿命特性は図4.1のとおりで、ホルマル線とポリエステル線の間位置しB種にランクされる。また図には示していないが各種含浸ワニスの相容性も良好な結果が得られている。過電流特性から判断すると、その耐熱性はホルマル線およびポリエステル線より数段良好な結果が得られている。(図4.2参照)

MEDIS 電線ワニスAの欠点は、熱軟化温度の荷重依存性がやや大きいことである。図4.3の(a), (b)に示しているごとく線径が細いほどその傾向が強い。したがって一般用としては、ポリエステル線が使用されている用途には十分適用可能であるが、特に大きな荷重をうけるところに使用するには注意が必要である。

それに対してMEDIS電線ワニスBは耐熱寿命特性に関して、ワニスAに若干劣るが、熱軟化温度、機械特性および耐溶剤性などワニスAよりはるかにすぐれている。それぞれの電線にはそれぞれの特長を有しており、用途に応じて最適な電線を選ぶ必要がある。現在われわれのところの開発してきた電線のうち、それらの代表例を紹介しよう。表4.2はB種クラス的一般特性で、表4.3は耐溶剤性MEDIS電線とホルマル線ならびにポリエステル線との耐溶剤特性である。その耐溶剤性の試験は、各溶剤に40°Cにて24時間浸漬した後取り出し絶縁皮膜の状態を観察し、鉛筆硬度にて調べ皮膜にキズをついた鉛筆硬度であらわしたものである。

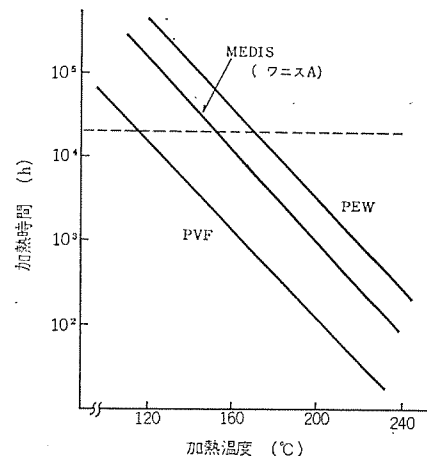


図 4.1 IEEE No. 57 法 耐熱寿命
IEEE No. 57 Thermal life.

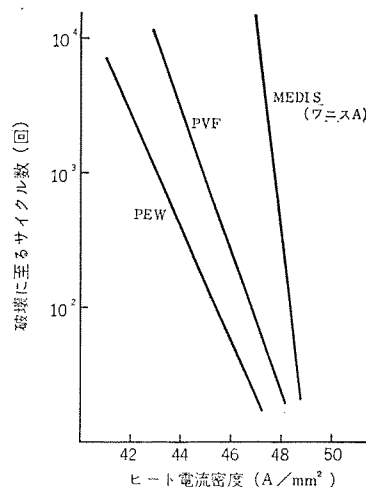


図 4.2 過電流試験
Burnout test.

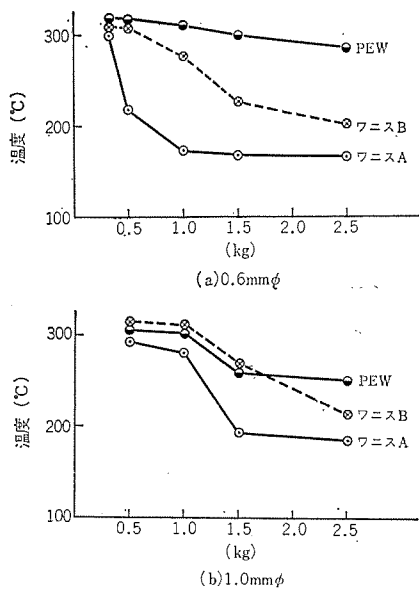


図 4.3 熱軟化荷重依存性
Cut-through temperature vs. load.

表 4.2 各種 MEDIS 電線の一般特性
(線径いずれも 0.6 mmφ)
Property of various MEDIS wires.

試 験 項 目	ワニスA	ワニスB	ワニスC
ピンホール (コ/5 m) 劣化巻付 (200°C, 5 h) サドンジャンク	0 3倍径合格 O. K	0 自己径合格 O. K	0 自己径合格 O. K
伸 張 巻 付 (%) ひねり回数 (回)	70 162	>100 213	>100 198
耐 摩 耗 性	T I S 式 (回) NEMA式 (g)	101 2,343	78 1,725
熱 軟 化 温 度 (C°)	232	305	>315
ヒート ショック	150°C 180°C 200°C	自己径合格 自己径合格 2倍径合格	自己径合格 自己径合格 自己径合格
絶縁破壊電圧 (kV) Hg 中絶縁破壊電圧 (V)	6.5 3,800	7.5 4,000	7.8 4,600

表 4.3 MEDIS 電線と一般電線の耐溶剤性
(線径いずれも 0.6 mmφ)

Solvent resistance of MEDIS wire in comparison
with conventional wire.

溶 剤	MEDIS (ワニスB)	PVF	PEW
ア ル コ ール 系	メチルアルコール エチルアルコール ブチルアルコール	5H 9H 以上 9H 以上	HB HB HB
ケ ト ン 系	アセトン メチルエチルケトン	6B 9H 以上	2B 6B 以下
石 油 系	ガソリン ベンジン	9H 以上 9H 以上	7H HB
エ ス テ ル 系	酢酸エチル 酢酸ブチル	9H 以上 9H 以上	HB HB
芳香族炭化水素	ベンゾール トリオール オシロール	9H 9H 以上 9H 以上	H HB HB
塩化炭化水素系	四塩化炭素 四塩化エタン トリクレン	7H 9H 以上 9H	7H 7H B
浸 漬 剤		9H 以上	7H

実機に採用される場合には、耐湿性・巻線加工劣化特性などがおもに重要視されることが多い。また使用目的によっては、耐スチロール性・耐フロン性など特殊な性能を要求されることがあり、MEDIS 電線もあらゆる角度から検討し、従来のエナメル電線と見劣りのしない電線が開発されている。

丸線以外の電線では、電動機の電機子コイルなどの素線絶縁の開発にも力をそそぎ、電着ワニスに無機物の粉体を混入することにより、耐熱性の良好な絶縁皮膜の見通しが得られ、現在実機レベルでの各種評価が行なわれている。

5. 将 来 性

電線に関しては従来のエナメル電線が使用されている分野、すなわち需要の最も多い丸線のマグネットコイルのほか、変圧器などの平角線などにも近い将来適用されていくと思われる。特に電着絶縁の特長とする厚膜用の絶縁電線など、(従来のエナメル電線では考えられなかったビニル被覆電線ならびにテフロン電線など)の分野にも、拡張されるであろう。また導体も銅線だけでなく、アルミ材でも特殊な処理を行なうことによって電着が可能である。電線以外ではあらゆる金属の電着絶縁が考えられ、今後は銅材以外の電着絶縁が主体となるであろう。

6. む す び

以上 MEDIS に関するプロセス・材料・特性について述べてきたが、今後は、研究開発の指針を生産性の向上、実機適用に向け、各場所のご要望に応じたい。最後に MEDIS 電線の実用化に当たりましては、大日本電線(株)の巻線部、第一電工(株)の研究室の皆様のご尽力の賜と考え、この紙面をお借りしまして厚くお礼申し上げます。(昭和 47-7-31 受付)

参 考 文 献

- (1) 駒形：界面電気化学概要，昭晃堂ほか多数
- (2) 電気化学便覧，電気化学協会編，丸善
- (3) A. R. H. Tawn, J. R. Berry : Off. Dig. Sept. (1965)
- (4) F. Beck, H. Pohleman, H. Spoor : Farbe u. Lack, 73, (4), (1967)
- (5) P. bebye : J. Appl. Phys., 15, 338 (1944)
- (6) 特許公報，昭和 45-31555 号

塗装におけるリン酸塩処理の再評価

島本 幸三*・駒沢 吉郎*

岩田 義郎**

Renewed Appraisal of Phosphate Treatments in Painting

Consumer Products Research Laboratory Kôzô SHIMAMOTO・Yoshirô KOMAZAWA

Head Office Yoshirô IWATA

From various kinds of phosphate treatments widely used for ground coating in painting, zinc and iron compound groups are taken up particularly for renewed appraisal. That means, studies have been made on the phosphating agent of the two groups regarding corrosion resistance of films, sludge formative quantity and adaptability to representative kinds of paint (solvent paint and electrophoretic paint). As a result it has been found that the composition of the phosphating agent is an important factor to govern the performance of the film and that the agent has adaptability to any of the paint. Furthermore, the performance of iron phosphating group agent is found to be elevated up to the level of zinc phosphating group through the improvement of additive, although the former was considered inferior to the latter in regard to the corrosion resistance.

1. ま え が き

リン酸塩処理法は1915年に米国ではじめて実用化されてから、半世紀以上の歳月を経過した。その間に研究成果は多く発表されているが、使用者は、被塗物・処理条件などから今日でも経験的に選択する 경우가多く、塗装クレームのうち、リン酸塩処理がしばしば原因となることがあった。また塗装の下地処理としてのリン酸塩処理は、一般的うす勢として耐食性の向上、処理時間の短縮、装飾塗装・廃液処理のしやすさなどから薄膜・密化に向かっている。

以上の観点から、本文は薄膜型リン酸亜鉛系処理剤と改良型リン酸鉄系処理剤を取上げ、処理皮膜単体の耐食性ならびにスラッジの生成量を比較するとともに、塗装との適合性を調べたものである。

2. リン酸塩処理剤

一般に塗装下地処理に要求される性能はつぎのようである。

- (1) 腐食性の液体(水・塩水など)から素地金属を隔離すること。
- (2) 素地金属との密着力が強く、容易にはく離しないこと。
- (3) 塗料との密着力が強いこと。

これらを満足するには、金属面に生成する処理皮膜が化学的に安定かつ密で、比較的薄いことが必要である。この要求を満たす一つの方法としてリン酸塩処理がある。リン酸塩処理皮膜の性能を左右する要因には、金属の表面状態、処理剤の組成、処理時間・処理温度・処理方法(スプレ法・浸漬法)などがあげられる。なかでも処理剤の組成は大きく影響する。

現在、一般に使用されている鋼材用リン酸塩処理法は、リン酸マンガン法・リン酸マンガン亜鉛法・リン酸亜鉛法・リン酸亜鉛カルシウム法・リン酸鉄法の5種類に大別できる。このなかでもよく使用されているのが、亜鉛系処理法と鉄系処理法である。

2.1 リン酸亜鉛系処理法

リン酸亜鉛系処理法には、一般に単純リン酸亜鉛法と促進リン酸亜鉛法がある。前者は処理条件として高温・長時間を要するため、現在ではほとんど使用されていない。したがって、リン酸亜鉛系

処理法といえば促進法を意味する。この処理剤は、主成分の $Zn(H_2PO_4)_2$ 溶液に反応促進剤として、硝酸塩・亜硝酸塩・塩素酸塩・臭素酸塩などを添加したものである。メカニズムはまだ明らかでないが、化成反応促進と結晶の微粒化の両作用を兼ねるものとして、Ni、Coイオン、フッ化物または有機ニトロ化合物を加えることがある。このほか、処理皮膜が特に微細で、かつ皮膜重量 2.5 g/m^2 以下の薄膜を望む場合には、結晶微粒化剤として脂肪酸ヒドロキシカルボン酸(クエン酸・酒石酸など)、グリセリン酸塩または縮合リン酸(トリポリリン酸塩・ピロリン酸塩など)を添加することがある⁽¹⁾。

リン酸亜鉛系処理法で鋼材面に形成された皮膜組成は、リン酸亜鉛とリン酸鉄であり、化学式 $Zn_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ 、 $Zn_2Fe(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$ の混合であることが確認されている⁽²⁾。

筆者らが撮影した電子顕微鏡写真(図2.1)では、添加剤の有無またはその量的な違いで結晶形状が異なる。特別な添加剤を含まない(a)は、板状結晶と針状結晶の混合形である。Niイオンやフッ化物を添加した(b)、(c)は、針状結晶が多く、しかも細くなり、試験結果でも良い性能を示している。

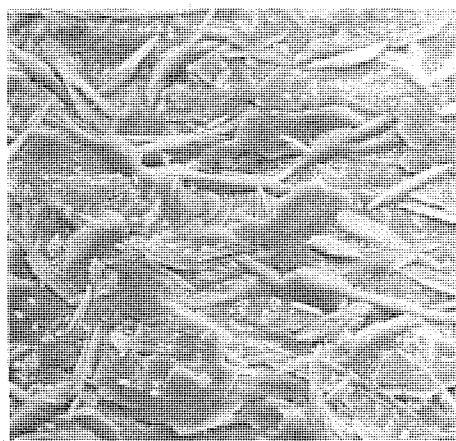
2.2 リン酸鉄系処理法

主成分は NaH_2PO_4 、あるいは $NH_4H_2PO_4$ である。これに反応促進剤(酸化剤)として亜硝酸塩・塩素酸塩・臭素酸塩などを添加する。特にリン酸鉄系処理法においては、反応促進剤の選択が処理皮膜の均一性に大きな影響を及ぼす。金属面へのぬれと拡散をよくするために界面活性剤を併用する場合もある。

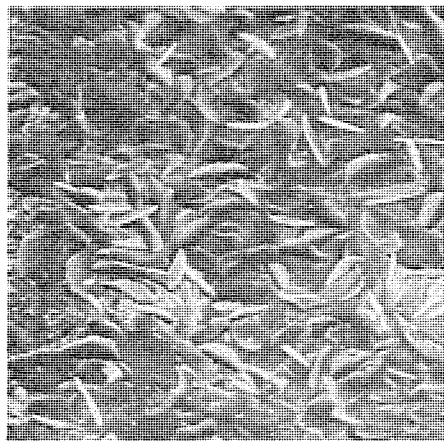
鉄系処理法によって生成する皮膜組成は、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と $FePO_4$ とから成り⁽³⁾、皮膜の厚さは 2μ 以下の薄いものである。この皮膜は処理剤の主成分・促進剤・添加剤の種類と量に関係なく、図2.2に示すようにすべて非晶質であり、均一性に富み、塗装下地処理皮膜としては良好な結果が予想される。

これまでのリン酸鉄系処理剤は、皮膜の色調変化が多いこと、皮膜形成に高温を要すること、防錆力に乏しいことなど、多くの欠点を持っていたが、現在では著しく改良された。最近市販されている鉄系処理剤の特長はつぎのとおりである。

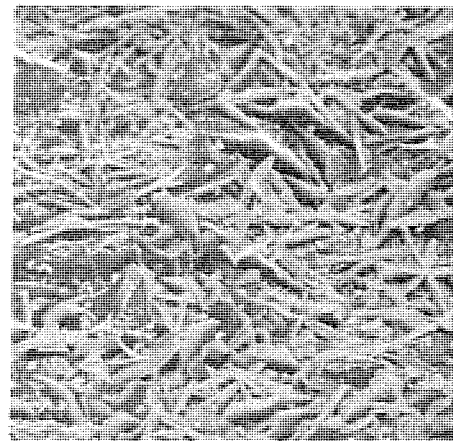
- (1) 処理条件の設定や液管理がリン酸亜鉛系より容易である。



(a) 特別な添加剤なし

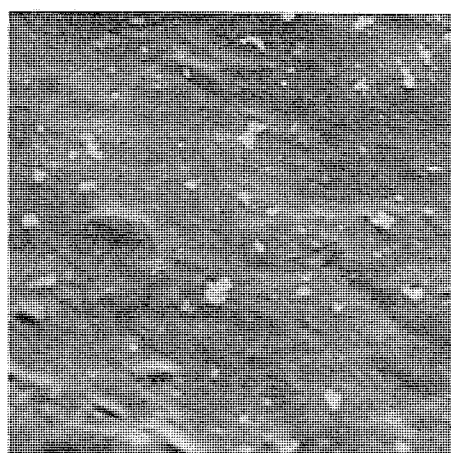


(b) Ni イオン, フッ素物添加

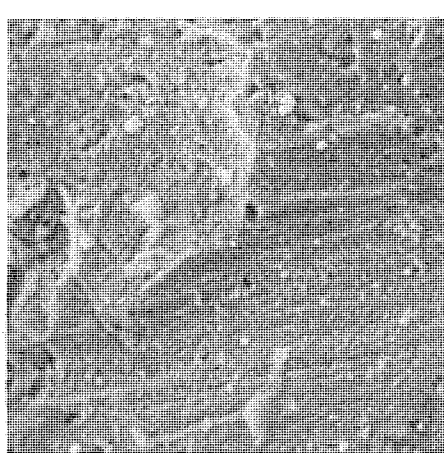


(c) Ni イオン [(b) の 3 倍], フッ素物添加

図 2.1 リン酸亜鉛処理皮膜の顕微鏡写真 (×500)
Photomicrographs of zinc phosphating film.



(a) リン酸ソーダ系



(b) リン酸アンモン系

図 2.2 リン酸鉄処理皮膜の顕微鏡写真 (×2,500)
Photomicrographs of iron phosphating film.

(2) 処理皮膜は酸化皮膜であり、均一かつ緻密であるため、皮膜自体の耐食性がすぐれている。また塗装した場合に塗膜の光沢は良好である。

(3) 塗料の密着性がきわめて良好である。

(4) 処理能力 (処理剤の単位重量当たりの処理面積) が大きく、亜鉛系に比べて経済的にも有利である。

(5) スラッジの生成量が少ない。

(6) 界面活性剤を添加したものは、さび・よごれが少ない場合に、脱脂・除錆・皮膜化成の各処理を一工程で行ない、しかも実用的に十分満足できる性能を得るので、生産性が良い。

3. リン酸塩処理皮膜単体の試験

使用者がリン酸塩処理剤に要求する性能は、つぎのように集約される。

(1) 処理皮膜自身の耐食性や塗料との密着性が良いこと。

(2) 化成処理工程でのスラッジの生成量が少ないこと。

(3) 廃液処理が容易なこと。

ここでは、表 3.1 に示すようにリン酸鉄系・亜鉛系処理剤のなかで、組成の若干異なるものを市販品から選び、(1), (2)について試験した。

3.1 リン酸塩処理皮膜の耐食性

3.1.1 試験方法

リン酸塩処理皮膜の耐食性試験法としては、MIL・ASTM・DIN 規格などがあるが、筆者らは独自の方法を採用した。すなわち、鋼板 (SPCC) 製テストピース (100×70×0.8 mm) をアルカリ脱脂し、それぞれ所定の処理条件で化成処理し、50°C、90 % RH 以上のふん囲気中に 24 時間放置し、表面状態を観察した。

3.1.2 試験結果

試験結果を表 3.2 に示す。発錆状態を見ると、予想以上に亜鉛系処理皮膜はさび(錆)やすく、鉄系処理皮膜に比べて劣ることがわかる。

鉄系処理層は非晶質の均一な皮膜で、組成的に異種金属化合物を含まないが、亜鉛系処理層はリン酸亜鉛のほかに、異種金属塩としてリン酸鉄を含む結晶を作っている。このため水に接した場合、局部電池を形成して腐食

表 3.1 供試リン酸塩処理剤
Samples of phosphating agents.

皮膜系	記号	お も な 組 成
鉄 系	1	リン酸ソーダ, 塩素酸ソーダ系促進剤
	2	リン酸ソーダ, 臭素酸ソーダ系促進剤, 界面活性剤 (脱脂兼用)
	3	リン酸ソーダ, 特殊塩アンモン, 臭素酸ソーダ系促進剤, 界面活性剤
	4	リン酸アンモン, 臭素酸ソーダ系促進剤, 界面活性剤
亜鉛系	5	リン酸亜鉛, 硝酸塩, 亜硝酸塩, Ni イオン, 多量のフッ化物
	6	リン酸亜鉛, 硝酸塩, 亜硝酸塩, Ni イオン, 微量のフッ化物

表 3.2 耐食性試験結果
Test results of resistance for corrosion.

皮 膜 系	記 号	発 錆 状 態	順 位
鉄 系	1	部分的に点錆発生	1
	2	部分的に点錆および薄錆発生	4
	3	部分的に点錆発生	1
	4	部分的に点錆発生	1
亜 鉛 系	5	全面に点錆および薄錆発生	5
	6	全面に点錆および薄錆発生	5

表 3.3 スラッジ生成量
Formative quantity of sludge.

皮 膜 系	記 号	スラッジ生成量 g/m ²
鉄 系	1	6.1
	2	5.4
	3	11.8
	4	1.9
亜鉛系	5	30.0
	6	33.1

が促進されるものではないかと考えられる。今回試験した リン 酸亜鉛系処理剤は、添加剤の量が異なるにもかかわらず、ほぼ同等の発錆状態であったことから、皮膜単体の耐食性は、形成皮膜の結晶形や厚さよりも組成が影響すると考えられる。これについては今後も確認をする予定である。

鉄系処理皮膜のなかでは、特に脱脂・化成処理兼用の No. 2 が他に比べて悪かった。これは、液 バランス のくずれや脱脂過程で、銅板面から除いた防錆油・よごれなどが処理液中へ混入して、化成処理能力を低下させたものと考えられる。このため不完全な リン 酸鉄処理皮膜を形成したのであろう。

3.2 スラッジ生成量

化成処理を比較検討するとき、皮膜の性能以外にスラッジ生成量も重要である。作業の合理化、生産性の向上などがいっそう必要とされる昨今では、化成処理そうに沈殿するスラッジの清掃に費やす時間は無視できない。

3.2.1 測定方法

表 3.1 の リン 酸塩処理剤のスラッジ生成量を調べた。測定は試験用スプレ式処理装置を用い、所定枚数のテストピースを処理したのち、液中に沈降したスラッジをろ過し、測定した。

3.2.2 測定結果

結果を表 3.3 に示す。これより鉄系処理剤は亜鉛系に比べて、スラッジ生成量が著しく少なく、両者の性状に差があることがわかる。鉄系のスラッジは、浮遊性で FePO_4 が主成分であるのに対し、亜鉛系は FePO_4 と $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ が主成分であり、沈降性が強い。そのため亜鉛系処理剤の生成スラッジは、スプレ配管内部やそう(槽)壁などに固着し、容易にはく離しない。亜鉛系処理剤を用いる塗装ラインでは、一般に1回/週以上の割合で処理そうを清掃する必要がある。一方鉄系処理剤の場合は長時間使用すれば、スラッジは固着するが、亜鉛系処理剤から鉄系に変更することにより、その清掃ひん度は1/5~1/10に減少する。

4. 塗装におけるリン酸塩処理の検討

4.1 リン酸塩処理と溶剤型塗装

試験した化成処理剤および塗料を表 4.1、表 4.2 に示す。テストピースは、すべて銅板 (SPCC) 100×70×0.8mm を用いた。

4.1.1 試験方法

(1) 塩水噴霧試験： あらかじめ塗膜面から素地金属にまで達するクロスカットをしたテストピースを、JIS Z 2371 に基づいて140時間噴霧する。その後セロファンテープによるはく離試験をして、塗膜のはく離幅を測った。

(2) 腐食促進試験： 腐食促進液として食塩 50 g/l、30%過酸化水素水 50 ml/l、氷酢酸 10 ml/l の混合溶液を作り、テストピースを完全に浸漬し、50℃、24時間加熱した。試片を取出して乾燥後、セロ

表 4.1 供試リン酸塩処理剤
Samples of phosphating agents.

皮膜系	記号	お も な 組 成
鉄 系	1	リン酸ソーダ、塩素酸ソーダ系促進剤
	2	リン酸ソーダ、臭素酸ソーダ系促進剤、界面活性剤(脱脂兼用)
	3	リン酸ソーダ、特殊塩アンモン、臭素酸ソーダ系促進剤、界面活性剤
亜鉛系	4	リン酸亜鉛、硝酸塩、亜硝酸塩
	5	リン酸亜鉛、硝酸塩、亜硝酸塩、Ni イオン、フッ化物

表 4.2 供試塗料
Samples of paints.

塗 料 系	記 号	お も な 組 成
メラミン	A	メラミン：ユリア：アルキッド＝1.5：0.5：8
	B	メラミン：アルキッド＝3：7
アクリル	C	アクリル：メラミン：エポキシ＝7：2：1

表 4.3 溶剤型塗料との適合性
Adaptability for paints of solvent type.

項 目 皮膜記号 塗料系記号		塩水噴霧	屋外暴露	促進腐食	密着性
鉄系	1	A B C	△ × ○	○ ○ ○	△ △ ○
		A B C	× × △	○ ○ ○	○ ○ ○
	3	A B C	○ △ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	4	A B C	○ △ ○	○ ○ ○	× × △
	5	A B C	○ △ ○	○ ○ ○	× △ △
	判 定 基 準	内 容	片 側 は く 離 幅 (mm)		残 存 目 数
		○	1.0 以下		90/100 以上
		△	1.1~1.9		80~89/100
		×	2.0 以上		79/100 以下

ファンテープによるはく離試験をして、塗膜の状態を調べた。

(3) 屋外暴露試験： クロスカットをしたテストピースを南面に45度の傾斜で暴露台にとり付け、6ヵ月さらした後、セロファンテープによるはく離試験をした。

(4) 密着性試験： 塗膜を鋭利な刃物で1mmの碁盤目100個を切り、これをセロファンテープはく離試験して、残った目数で比較した。

4.1.2 試験結果

結果を表 4.3 に示す。鉄系・亜鉛系処理皮膜それぞれについて検討する。まず鉄系のなかで、脱脂兼用の No. 2 は他に比べて耐食性が劣る。その原因は 3.1.2 項で述べた理由の化成処理不足にためであろう。逆に特殊塩アンモンを添加した No. 3 は最も耐食性にすぐれ、塗料との組合せによっては、亜鉛系処理皮膜 No. 4、No. 5 に十分匹敵する性能を示す。亜鉛系処理皮膜では、結晶の密化を図った No. 5 のほうが、添加剤を含まない No. 4 よりも耐食性が高いのは予想どおりの結果である。

いずれにしても、塗膜の性能は塗料樹脂の種類に影響される。試験結果について考察するとつぎのようになる。

(1) 塩水噴霧による耐食性試験では、鉄系処理皮膜よりも亜鉛

系のほうがすべての塗料で良好な傾向にある。これは鉄系処理皮膜は、素地表面に酸化鉄皮膜がおお(被)った状態になっている。しかし一度素地が腐食を起こすと、酸化鉄皮膜は、腐食反応を抑止する力が弱いので、内部から腐食が進行する。これに反して、亜鉛系処理皮膜は素地表面にリン酸亜鉛・リン酸鉄の結晶が存在し、素地の一部が食塩水に接触しても、これらの結晶は、鉄素地の腐食抑止力が強いと考えられ、その進行を阻止するのであろう。このため亜鉛系のほうが鉄系より良好となったものと考えられる。

(2) 腐食促進試験では、(1)に反して亜鉛系処理皮膜に比べ鉄系のほうが良い傾向にある。ここでは、クロスカットしなかったので腐食液は塗膜を浸透して、まず化成皮膜に達する。したがって、両者の差は、リン酸亜鉛・リン酸鉄の混合結晶と酸化鉄皮膜との耐食性の差によることになる。前節で述べたように、皮膜の耐食性は酸化鉄皮膜のほうが大であることから、鉄系処理皮膜のほうが亜鉛系よりも良好となる。さらに亜鉛系処理皮膜は、その結晶粒界や結晶間げきに異種金属および不純物(可溶性イオン)の存在が考えられ、耐ブリスタ性や耐食性に悪影響を及ぼす。これに対して鉄系処理皮膜は非晶質であるため、表面は比較的なめらかで、化成処理後の水洗で不純物の残存はきわめて少なくなる。このため鉄系処理皮膜は、亜鉛系より耐ブリスタ性(耐食性)が良くなる。

また鉄系処理皮膜のほうが、塗膜との密着性が良いことも鉄系が良い理由の一つにあげられる。

(3) 塗膜の密着性に関する機械的な試験では、鉄系が亜鉛系よりやや良い傾向にある。界面的に考えた場合、リン酸塩処理皮膜と塗膜の密着性は塗装品の耐食性に深い関係がある。

鉄系処理皮膜は酸化皮膜であるので、リン酸亜鉛の結晶に比べて、塗膜形成分子中に含まれる極性基との結びつきが強い⁽⁴⁾。また熱による皮膜変化の少ない鉄系処理皮膜のほうが、変化の大きい結晶性の亜鉛系処理皮膜より塗膜との密着性の低下が少ない。すなわち、塗膜焼付け時(約160°C)に、亜鉛系皮膜はその結晶形を変える。一方鉄系は非晶質の酸化皮膜で250~300°Cまで安定であるから⁽⁵⁾、鉄系処理皮膜では、塗膜焼付け時の密着性の低下がほとんどないとみられる。

4.2 リン酸塩処理と電着塗装

電着塗料は多くの長所を持っているが、塗料自身が水溶性で、しかも電気泳動・電気分解・電気浸透など電気的作用を受けながら塗装されるので、塗装機構が複雑で、つぎのような欠点がある。

(1) 同じ樹脂系の溶剤型塗料に比べ耐食性が劣る。

(2) 電着塗装時には被塗物はアノード状態で荷電されるため、表面の金属が溶出し、塗膜は悪影響を受けやすい。

(3) リン酸塩処理皮膜の表面状態の影響を受けやすい。

この欠点を補うため、リン酸塩処理皮膜に要求される性能はきびしくなる。

筆者らは、処理剤の組成ならびに結晶形が異なるものを市販品から5種類選び、樹脂系が異なる9種類の電着塗料との適合性を塗膜の耐食性・物性などを通して検討した。試験したリン酸塩処理剤と電着塗料を表4.4、表4.5に示す。

4.2.1 試験項目

(1) 光沢測定: 光沢計を用いて入射角60°の鏡面反射率を測った。

(2) エリクセン試験: エリクセン試験器ではなく離までの押出し距離を測った。

表 4.4 供試リン酸塩処理剤
Samples of phosphating agents.

皮 膜 系	記号	おもな組成	結晶構造	皮膜重量 g/m ²
鉄 系	1	リン酸アンモン、臭素酸カリ	非晶質	0.4~0.8
	2	リン酸ソーダ、特殊塩アンモン、臭素酸ソーダ、界面活性剤	非晶質	1.2~1.5
亜鉛・カルシウム系	3	リン酸亜鉛、リン酸カルシウム、亜硝酸塩	粒状結晶	2.0~2.5
亜 鉛 系	4	リン酸亜鉛、硝酸塩、亜硝酸塩、Niイオン	針状・板状結晶	2.0~2.5
	5	4にフッ化物を添加したもの	4よりやや微細	1.5~2.0

表 4.5 供試電着塗料
Samples of electrophoretic paints.

塗 料 系	記 号	用途区分	おもな組成の相違
エポキシエステル系	A	下 塗	エポキシエステル+メラミン(少量)
	B	上 塗	エポキシエステル+メラミン(多量)
	C	下 塗	エポキシエステル+メラミン(中量)
マレイン化油系	D	下 塗	マレイン化油+メラミン(少量)
	E	下 塗	マレイン化油+酸無水物+メラミン(少量)
ポリブタジエンマレイン化油系	F	下 塗	ポリブタジエン変性マレイン化油+メラミン(多量)
アルキッド系	G	上 塗	トリメリット酸剤性アルキッド
	H	下 塗	フェノール変性アルキッド
アクリル系	I	上 塗	アクリルエステル+メラミン(多量)



図 4.1 付きまわり性テストピース
Test piece for throwing power

(3) 塩水噴霧試験: 4.1.1項(1)と同じで120時間連続噴霧した。

(4) 腐食促進試験: 4.1.1項(2)と同じ組成の腐食液に、ここではクロスカットしたテストピースを24時間浸漬した。

(5) 塗料のわき出し性試験: テストピース(100×70×0.8mm)を2枚用意し、100×10mmの合せ目に40mmの間隔で3点スポット溶接する。これを脱脂・リン酸塩処理したのち、塗装して合せ目から塗料のあわ(泡)吹き現象を観察した。

(6) 付きまわり性試験: あらかじめリン酸塩処理した2枚のテストピースを図4.1に示すように1mmの間げきをもたせて重ね合わせる。これを電着塗装して内面と外面の膜厚比を測定した。

(7) 水洗はく離性: 電着塗装直後にクロスカットしたテストピースを、水道じゃ(蛇)口(口径9mm)から60mm下に約30°の角度で保持し、2l/minの流速で、15秒間水道水を落下させたときの塗膜のはく離状態を観察した。

4.2.2 試験結果

各項目についての試験結果を表4.6に示す。表4.6をリン酸塩処理皮膜の面からみると、つぎのようになる。

(1) 一般に、光沢はリン酸亜鉛系よりも鉄系のほうが良好であるといわれるが、試験では塗料の種類による差が大きく、リン酸塩処理間の有意差は認められなかった。

(2) エリクセン試験でも、その良否は塗料の種類によることが大きい。エポキシ系(A~C)、ポリブタジエン・マレイン化油系塗料との組合せで、亜鉛系処理皮膜よりも鉄系のほうが良いものがあった。これは塗膜自体が若干硬い性質のため、皮膜結晶粒の大きい亜鉛系処理

表 4.6 電着塗料との適合性
Adaptability for electrophoretic paints.

塗料系記号			項目		光	沢	エリクセン	塩水噴霧	促進腐食	わき出し	水洗はく離	付きまわり性
鉄系	1	A	×	○	×	○	×	○	○	○	○	△
		B	○	○	×	×	×	○	○	○	△	
		C	△	○	×	×	×	○	○	○	○	
		D	×	○	×	×	×	○	○	○	○	
		E	○	○	×	×	×	○	○	○	○	
		F	○	△	×	×	×	○	△	×	×	
		G	△	○	×	×	×	○	○	○	○	
		H	△	○	×	×	×	×	○	○	○	
		I	○	×	×	×	△	×	○	×	×	
	2	A	×	○	△	○	△	○	△	○	△	
		B	△	○	△	×	△	○	△	○	△	
		C	△	○	×	×	△	○	○	○	○	
		D	×	○	×	×	×	○	△	○	○	
		E	○	○	△	×	△	○	△	○	○	
		F	○	△	×	×	△	×	△	×	×	
		G	×	○	×	×	△	×	○	○	○	
		H	△	○	△	×	△	△	×	○	○	
		I	○	×	×	×	○	×	×	○	×	
亜鉛・カルシウム系	3	A	×	×	△	○	△	○	△	○	○	
		B	×	○	△	○	○	△	○	○	○	
		C	△	○	○	○	△	△	○	△	○	
		D	×	○	△	×	×	△	○	△	○	
		E	○	○	○	×	○	△	△	×	×	
		F	△	×	×	×	△	△	×	△	△	
		G	△	○	○	○	○	△	×	○	○	
		H	△	○	○	○	○	×	○	○	○	
		I	○	×	△	△	△	×	○	×	×	
亜鉛系	4	A	×	△	○	○	△	○	△	○	△	
		B	×	○	△	○	○	△	○	○	○	
		C	△	○	○	○	○	△	○	○	○	
		D	×	○	○	○	○	△	○	○	○	
		E	○	○	○	○	○	×	○	○	×	
		F	△	△	△	△	○	△	△	×	×	
		G	○	○	△	○	△	×	○	○	×	
		H	△	○	○	○	○	×	○	○	○	
		I	○	×	△	△	○	×	○	×	×	
	5	A	×	×	○	○	△	○	△	○	△	
		B	×	○	○	○	○	○	△	○	○	
		C	△	○	○	○	○	△	○	○	○	
		D	×	○	○	○	○	△	○	○	○	
		E	○	○	○	○	○	×	○	○	×	
		F	○	△	○	○	○	△	△	×	×	
		G	△	○	△	○	△	×	○	○	×	
		H	△	○	○	○	○	×	○	○	○	
		I	○	×	△	△	○	×	○	×	×	
判定基準		内 容	反 射 率	押 出 距 離	片 側 は く 離 幅		泡 吹 き 状 況	は く 離 状 況	膜 厚 比			
		○	70 % 以上	7.0 mm 以上	1.0 mm 以下		異常なし	異常なし	70 % 以上			
		△	60～69	6.0～6.9	1.1～2.9		少	少	50～69			
		×	59 以下	5.9 以下	3.0 以上		多	多	49 以下			

皮膜の機械的ひずみに対して、塗膜が追従できずに、はがれを生じたと考えられる。アクリル系塗料は、他に比べて塗膜の可とう(撓)性が小さいため、どの処理皮膜も不良になった。

(3) 耐食性は、塩水噴霧・腐食促進試験とも、素地金属に達するクロスカットをしたため、同じ傾向が見られた。すなわち、鉄系処理皮膜より亜鉛系のほうが良好となった。これは 4.1.2 項での考察と同じ理由であろう。この場合、もしクロスカットをしなければ溶剤型塗料との組合せと同じく、鉄系処理剤のほうが亜鉛系よりも良い結果が予想される。

(4) 塗料のわき出し性では、鉄系処理皮膜が良好な結果を示した。その理由は、処理皮膜が 1 密で均一であるほど塗料の拡散が起こりやすく、塗料のたまり（溜り）が少ないためである。

(5) 付きまわり性は塗料によるところが大きい、鉄系処理皮膜が亜鉛系より電気抵抗が小さいものと考えられ、前者がやや良好

である。

(6) 塗料の水洗はく離性とリン酸処理皮膜との関係は確認できなかった。水洗はく離現象は、塗料の組成および変質によるところが大きいと考えられる。

以上、性能面からみると、リン酸鉄系処理剤では No. 2 が No. 1 よりも良い結果を示した。亜鉛系では No. 4 よりも結晶を微粒化した No. 5 が耐食性でやや良い傾向にある。比較参考のため試験した亜鉛-カルシウム系は、ほとんどその特長はみられなかった。

電着塗装の下地処理に鉄系処理剤を使用する場合、耐食性に問題が残る。しかし塗料によっては十分適合するものもあり、また、今後の組成改良で従来の亜鉛系と同等以上の性能をもつ処理剤の出現も可能である。

4.2.3 リン酸塩処理皮膜の溶出量

試験には鉄系処理剤 1 種類、亜鉛系処理剤 2 種類を市販品から選

表 4.7 電着塗装時の皮膜の溶出量
Soluble quantity of phosphating film during
electro phoretic coating.

皮 膜 系	内 容	皮膜析出量 g/m ²	皮膜溶出量 g/m ²	溶 出 比 %
鉄 系	薄膜タイプ	0.50	0.07	14.0
	中膜タイプ	0.78	0.17	21.8
亜 鉛 系	中膜タイプ	2.55	0.16	6.2

び、処理したのち、アクリル系電着塗料を塗装した。そのとき溶出する化成処理皮膜の量をテストピースの塗装前後の重量差で求めた。

試験結果を表 4.7 に示す。鉄系処理皮膜の単位面積当たりの溶出量は亜鉛系の 1/2 以下である。溶出比（溶出量／析出量）は逆に厚膜タイプの亜鉛系のほうが少ない。しかし電着塗装で問題となるのは溶出イオンの量であるから、溶出量が少ない鉄系処理剤が亜鉛系よりも有利である。亜鉛系処理皮膜は、薄膜タイプでも厚膜タイプでも溶出量はほとんど変わらない。これは結晶形・厚さ・粗密さが異なっても、皮膜組成が同じであることに起因すると考えられる。電着塗装に亜鉛系処理剤を用いる場合、溶出量に差はなくとも、密着性・耐食性などから、中膜または薄膜タイプを選ぶほうが望ましい。

5. む す び

従来から塗装下地処理として、広く用いられているリン酸亜鉛系

処理と鉄系処理について再評価した。結論を要約するとつぎのとおりである。

（１） 処理皮膜単体の耐食性は、亜鉛系よりも鉄系のほうがすぐれている。

（２） 処理時のスラッジ生成量は、亜鉛系よりも鉄系のほうが少ない。

（３） クロスカットした場合の耐食性は、亜鉛系が鉄系よりもすぐれているが、クロスカットしない場合は逆の結果となる。

（４） 電着塗装時のわき出し性、付きまわり性、処理剤の溶出などの面では、亜鉛系よりも鉄系のほうが良好である。

（５） 溶剤型塗装・電着塗装に対して、リン酸亜鉛系処理を施す場合、結晶が ち密で均一なものが望ましい。

どのような塗装においても、幅広く、十分に検討して、それに最も適したリン酸塩処理剤を選ぶことが必要である。

参 考 文 献

- （１） 麻田：金属表面技術便覧，765（昭 38），日刊工業新聞社
- （２） 岡部：塗装技術，38（昭 43-5），理工出版社
- （３） 岡部：塗装技術，41（昭 43-5），理工出版社
- （４） 岡部：塗装技術，35（昭 43-5），理工出版社
- （５） 古川：工業材料，14，9，（昭 41），日刊工業新聞社



特許と新案

開 閉 装 置

考 案 者 永 田 秀 次

一般に高絶縁性の気体を用いれば、わずかな気体間げき(隙)で十分な絶縁距離がとれるが、断路器としてこれを利用するときには付帯装置のための別個の空間が必要であり、必然的に大形なものになる欠点がある。

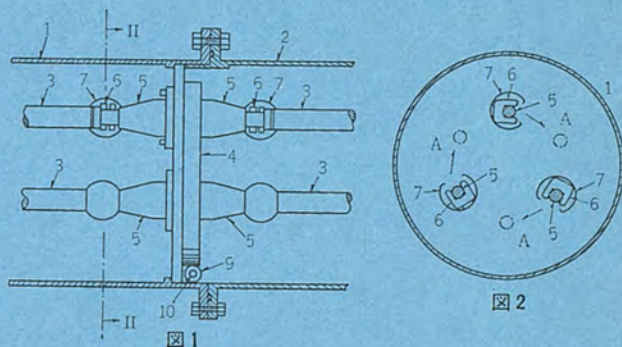
この考案は、このような欠点を改良したSF₆等の高圧ガスが充てんされた母線区分に用いる開閉装置に関するものである。

図1は、この考案による開閉装置を三相母線の断路器として実施したものの一例を示す断面図で、(1)、(2)は高圧ガスが充てんされた圧力容器の外被、(3)はこの内部に三角形の頂点に相当する位置に配設されて外被に適当な間隔で固定された母線導体、(5)は円板状回転体(4)上に取り付けられ、その先端が、前記母線の先端にある固定接触子(6)に接触して断路器を形成した3本のプッシングからなる可動接続体、(7)は上記接触部分をしゃへいするシールド、(9)は回転体(4)の周辺に設けられた歯車とかみ合い、かつ密封軸受を介して外被外に一部が突出した軸(10)を持ったウォームギヤである。

図2は、図1を矢印IIから見たもので、接続体(5)と固定接触子

(6)との関連位置を示す平面図で、ウォームギヤ(9)を回転させることによって円板(4)が矢印A方向に回転し、接続体(5)の先端は点線の位置に至って断路間げきが形成される。

以上のように、この考案は断路器を母線と同一の密閉室内に設けることができるので、密閉開閉設備の寸法をきわめて大幅に縮小させることが可能で、しかも構造がきわめて簡単になるという効果がある。
(実用新案登録番号 936276 号) (西野記)



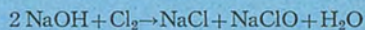
電 解 加 工 装 置

発 明 者 荒 井 伸 治・葉 石 雄 一 郎

この発明は塩素ガス処理を取り入れた電解加工装置に関するものである。超硬合金あるいは高炭素鋼の電解加工において、電解液に食塩水を用いると、加工中に相当多量の塩素ガスが発生し、人体に対してきわめて有害である。そのため、この発明においては、発生した塩素ガスを吸収除去し、安全に加工を行なうことができるようにしたものである。

図において、(1)は被加工体である、いわゆる GTi 30 (WC ; 84% , Co ; 16%)、(2)は電極としてのグラファイト、この電極(2)と被加工体(1)の間には交流電圧が印加されている。(3)は加工そう(槽)で、内部は電極軸と被加工体取付け定盤で構成され、それぞれ電極(2)と被加工体(1)が取付けられている。(4)は電解液そうで、内部には電解液(5)である 20% 前後の食塩水が入れられており、加工そう(3)とは電解液供給管(6)と電解液戻入管(7)とで連絡されており、電解液供給管(6)の一端に取り付けられた電極(2)から電解液(5)を被加工体(1)に射圧し、加工を行なわせ、加工の終わった電解液(5)は電解液戻入管(7)を通り、電解液そう(4)に循環される。(8)は送風ファンで、給気管(9)、(10)を通して加工そう(3)および電解液そう(4)に空気を送り、加工によって生じた塩素ガス Cl₂ を排気ガス導入管(11)、(12)を通して後述する塩素ガス吸収液へ送るものである。(13)は処理タンクで、この内部には塩素ガス吸

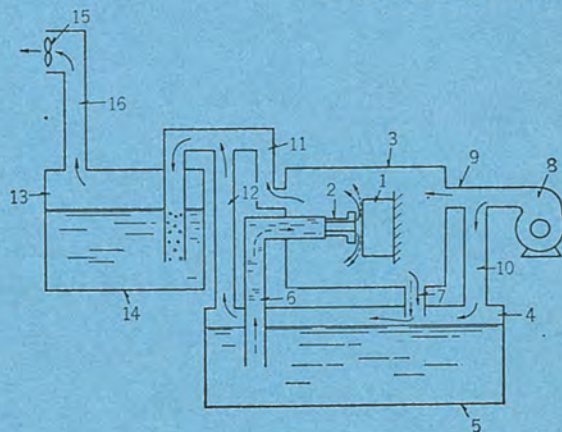
収液(14)である水酸化ナトリウムあるいは水酸化カリウム等の水溶液が入れられており、排気ガス導入管(11)、(12)から送られてきた排気ガスのうち、塩素ガスが塩素ガス吸収液(14)と次式のように反応する。



あるいは、 $2\text{KOH} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{KCl} + \text{KClO} + \text{H}_2\text{O}$

(15)は排気ファンで、塩素ガス吸収液(14)を通り、塩素ガスの除かれた排気ガスを排気管(16)を通して外部へ送りだすものである。

(特許第 587179 号) (久保記)



避雷器の特性低下度合検出方法

発明者 岡田昌治・永井信夫・三住日出夫

この発明は、実系統に設置された避雷器が、設置環境によるがい管の汚損によって、避雷器特性が低下する度合を安全に確認する検出方法に関するものである。

すなわち、最近では避雷器を設置環境による汚損から保護する目的で、がい管の表面にシリコンコンパウンド等の絶縁塗料を塗布する傾向にある。しかし、このような避雷器の特性は、がい管に塗布された絶縁塗料の劣化にきわめて大きく左右されるため、実系統中においての特性試験が必要であるが、実系統中で高圧あるいは超高圧系統用の避雷器を試験することは不可能である。

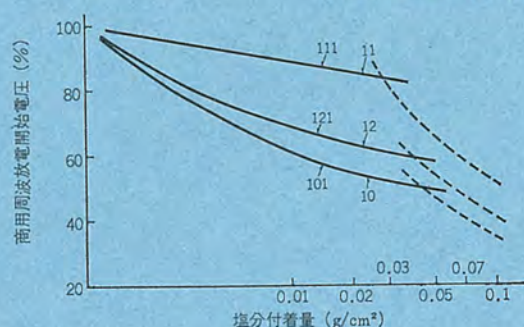
そこで、この発明による特性の低下度合を検出する方法は、実際に使用されている主避雷器と特性が類似であり、絶縁塗料の劣化による特性の変化割合が主避雷器よりも大きく、しかも小形軽量のパイロット避雷器を主避雷器と同一のふん囲気中に設置しておき、パイロット避雷器にときどき電圧を印加して特性を測定し、絶縁塗料の劣化によるパイロット避雷器の特性低下を検出する。

あらかじめ測定された主避雷器およびパイロット避雷器の汚損度合と特性劣化の関係を比較することによって、パイロット避雷器の特性低下度合を検知し、その度合に対応した主避雷器の特性低下度合を容易に知ることが可能であり、低下度合の精度も高いものが得られる。

図は、耐塩害形避雷器の健全状態における特性図である。図中の縦軸は、健全状態における放電開始電圧に対する商用周波放電開始

電圧の比(%)を示し、横軸は対数目盛による塩分付着量(g/cm²)を示す。曲線(10)は実系統に使用される主避雷器の特性を、曲線(11)は普通の配電用等の小形避雷器の特性を、曲線(12)はこの発明の目的に適するように普通の避雷器と比べて、高インピーダンスの抵抗体を多数設けたパイロット避雷器の特性をそれぞれ示す。そして、実線は放電ギャップの放電開始電圧を示し、点線はがいしの沿面せん(閃)絡開始電圧を示す。したがって、この発明の検出方法では、パイロット避雷器の放電開始電圧が曲線(12)の(121)の点であったと仮定すれば、高圧用の主避雷器の放電開始電圧は曲線(10)の(101)の点であり、小形の主避雷器の放電開始電圧は曲線(11)の(111)の点となり、主避雷器の特性低下度合はきわめて正確に検出できるものである。

(特許第598378号)(和田記)



マグネトロンの異常発振検出装置

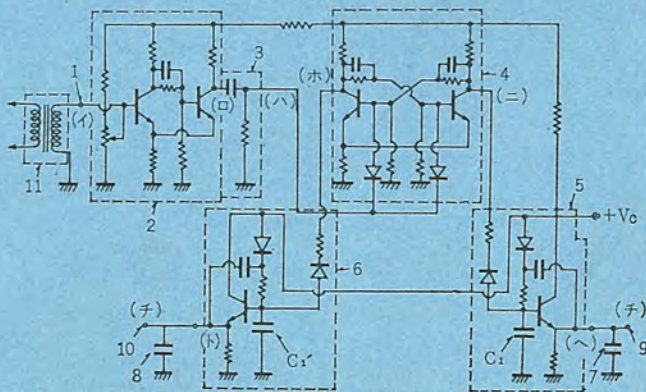
発明者 高瀬明生

この発明はマグネトロンの異常発振を簡単な回路構成で検出する装置に関するものである。一般にマグネトロンは、その負荷状態が悪いと、マグネトロンから放射される電磁波の一部は反射波として再びマグネトロンへと戻ってくる。そしてこの反射波が多くなると、マグネトロンの作用空間内の高周波電界を乱し、陽極と陰極との間に形成される正常な電子極を乱して、このマグネトロンの発振時にプレート電流波形に割れ等を生じさせる異常発振へと発展する。

図において、(1)はマグネトロンのプレート電流入力端子、(2)は入力信号をシュミット回路等によってパルス整形するパルス整形回路、(3)はパルス整形回路(2)の出力を微分する微分回路、(4)はこの微分回路(3)からの出力をトリガ入力とするフリップフロップ、(5)、(6)はフリップフロップ(4)を構成する二つのトランジスタのコレクタ出力電圧をそれぞれ積分するプットストラップ回路等からなる積分回路部、(7)、(8)はそれぞれ積分回路部(5)、(6)の出力を充電し、積分回路部(5)、(6)の出力のピーク値を取り出すコンデンサ、(9)、(10)は出力端子である。図に示すように、この発明はマグネトロンのプレート電流

波形をパルス整形し、そのパルスをトリガ源として反転するフリップフロップ回路を設け、入力信号の周期のずれを、フリップフロップ回路の出力幅の大小に変換し、さらにそのパルスを積分することにより、周期のずれを電圧の大小に変換し、マグネトロンの異常発振を検出するようにしたものである。

(特許第601766号)(久保記)



特許と新案

位相変調装置

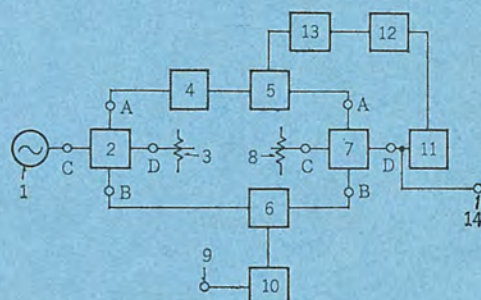
発明者 川口 義弘

この発明は、変調素子の不釣合いによる変調ひずみを軽減した位相変調装置を提供するものである。

図は、この発明による位相変調装置の実施例を示すブロック図である。図において、(1)は一定振幅の搬送波信号源で、この搬送波信号源(1)の出力搬送波をハイブリッド(2)で、等振幅、同位相の搬送波に分割するとともに、一方の搬送波を移相器(4)で $\frac{\pi}{2}$ ラジアン移相させ、これら分割させた搬送波を振幅変調器(5)、(6)で、それぞれ振幅変調した後、ハイブリッド(7)で合成するようにし、一方の搬送波の振幅変調を入力端子(9)に加えられた外部からの変調入力信号によって行なうとともに、他方の搬送波の振幅変調を上記合成された出力の振幅が一定になるように、この合成出力から得られる補償信号、すなわち電圧レベル検出回路(11)、電圧レベル比較回路(12)、駆動回路(13)からなる補償信号装置の出力信号によって行なうことにより、振幅が一定な位相変調波を得るようにしたものである。

この発明によれば、変調素子の不釣合いによる変調ひずみが軽減されるので、500 MHz以上の領域等において、通常そろう特性のものを得るのが困難な半導体ダイオードを有効に利用した位相変調装置が得られる。

(特許第615052号)(阪本記)



電子機器などの筐体支持装置

考案者 片山 泰一・岡本 勝義

この考案は内部に電子機器などを収容した筐体を、自動車のダッシュボード等に抜差自在に支持する支持装置を提供するものである。

図1は、この考案の電子機器などの筐体支持装置の平面図、図2は図1のII-II線における拡大断面図で、図に示されるごとく、左右両縁部をそれぞれL字形に折り曲げて案内レール(17)、(17')を形成した取付盤(16)を取付ボルト等により、自動車のダッシュボード等に固着し、上記案内レール(17)、(17')に、電子機器等が収容される筐体(1)の両側端に設けたしゅう動片(10)、(10')をしゅう動自在に載架し、かつ筐体(1)を取付盤(16)の所定位置に押し込んだとき、しゅう動片(10)、(10')に設けられた押えばね(14)、(14')および案内レール(17)、(17')に設けられた押えばね(20)、(20')によって、筐体(1)の両側端に設けられた上記しゅう動片(10)、(10')を上記案内レール(17)、(17')に圧着するようにしたものである。これにより振動時における筐体(1)の『ガタ』が防止される。

以上のようにこの考案は、筐体(1)は案内レール(17)、(17')としゅう動片(10)、(10')とにより、取付盤(16)に吊下げられるような状態でしゅう動自在に支持されるので、筐体(1)の側面に突出する、たとえば、冷却フィン(9)、(9')などは全面的に外部に露出するから、従来のように筐体(1)を外筐内に収納するようにしたものと比較して、冷却フィン(9)、(9')の熱効率が著しく向上し、温度上昇による電子機器の能率低下を防止することができる。また振動時における筐体(1)の『ガタ』がないので、筐体(1)内の電子機器の故障が軽減され、さらにまた支持装置の各部材は、すべてプレス加工によ

り簡単に製作することができるので、量産および原価低減に著しく貢献するものである。

(実用新案第926856号)(阪本記)

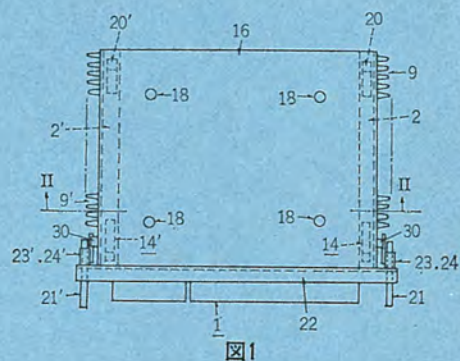


図1

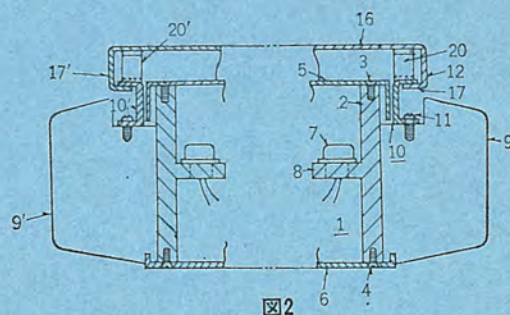


図2

特許と新案

船舶用救難滑り台装置

発明者 宇川 彰

貨物船では、貨物の満載時と空の時とはきつ(吃)水線すなわち海面からの甲板の高さが異なる。この発明はこのような甲板の高さの変化に対応できる船舶用救難滑り台装置である。

図について説明すると、気のうで作ったら(螺)旋状滑り部Aを直立状筒体の中に装置させた降下用滑り台 1, 11 を、船舶の側面にロープ5で吊下げ、降下用滑り台 11 の下部には救命いかだ12が装備され、また両降下用滑り台 1, 11 の間は乗替用渡し16があって、船舶の甲板より入口2から滑降した人が、救命いかだに避難できる ようになっている。

積荷がないときのように甲板が高くなっているときは図1に示すように降下用滑り台を複数個連結して使用すればよく、積荷の満載 時のように甲板が低くなっているときは、図4に示すように降下用 滑り台を単独使用すればよい。

(特許第610260号)(萩原記)

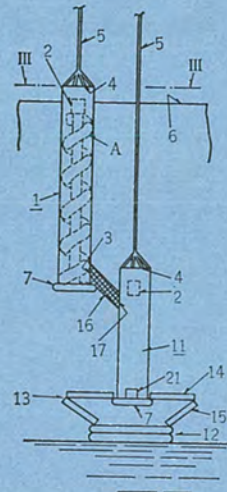


図1

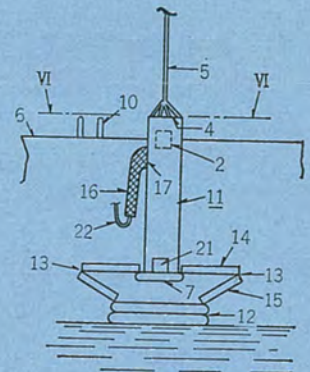


図2

電子機器などの筐体

考案者 野村 久幸

この考案は、分解組立が容易な電子機器筐体を提供するものである。

図1は、この考案の電子機器筐体の分解図、図2は側断面図で、(1)は内部に制御ユニット(7)を配設し、中間部にシールド板(8)を装着した側板、(13)、(14)はシールド板(8)の両側面に、それぞれ固着された一対の接栓で、この両接栓には送受ユニット(20)、(19)がそれぞれプラグインされる。(11)、(12)は上記送受ユニット(20)、(19)のガイドレル、(27)、(28)は上ぶた(蓋)と下ぶたで、その一端部に設けられた爪片(29)、(30)を上記送受ユニット(20)、(19)のそれぞれの長孔(31)、(32)に係合し、他端部に設けられたねじ(36)、(37)をねじ孔(35)にら(螺)合することによって、側板(1)に装着し、上記両ユニットを隠す(蔽)するようになされている。

このようにこの考案は、筐体を側板(1)、送受ユニット(20)、(19)、上ぶた(27)、下ぶた(28)等に分割し、プラグインまたは爪片の係合により結合し、組立て、単一の取付ねじ(36)、(37)によって、固着するようにしたもので、分解組立てが容易であり、機器の保守点検が迅速に行ない得られる実用的効果がある。

また、送受ユニット(20)と受信ユニット(19)とはシールド板(8)の両側に配設されるから、シールド効果により両ユニット間の干渉を防ぐこともできる。

(実用新案第926862号)(阪本記)

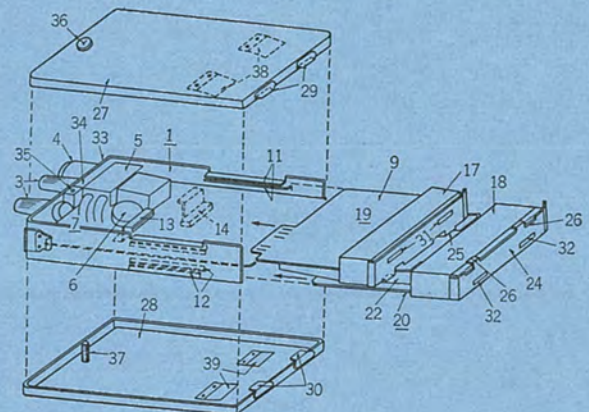


図1

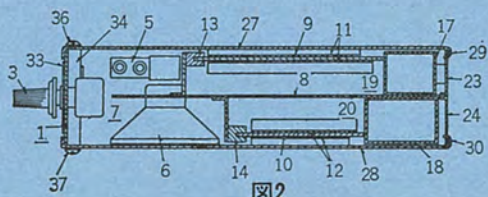


図2

大容量バーヒータ

喜多村 弘明*・松尾 茂*・豊田 烈*

Large Capacity Induction Bar Heaters

Itami Works

Hiroaki KITAMURA・Shigeru MATSUO・Isao TOYODA

Induction heaters are now in increasing demands because of their freedom from public hazard, automatic operation on the production line and elevation of quality of work. The case of induction bar heaters is no exception. Recently the largest bar heater of those built in this country has been delivered by Mitsubishi and operating with success. This article is a report on the event. This heater is coupled with a high speed automatic forging machine made by a Switzerland manufacturer, Hatebur, and called AMP 70 for the production of parts of automobiles. Mitsubishi has mastered many difficult points due to a large capacity and foreign make through their rich experience and technical knowhow in building it.

1. ま え が き

バーヒータは、棒鋼を連続的に送りながら鍛造温度に急速かつ均一に加熱する装置で、専用のフォーマと組み合わせることによって切断・鍛造成形に至る加工を1行程で行ないうる生産性の高い加熱機であり、ナット・ベアリングレース・ギヤブランクなどの製造には欠かせないものになっている。

従来は、通電加熱と保温用燃焼炉との併用、あるいは重油炉によって加熱されていたが、省力化・無公害化・生産性向上の点より、誘導加熱式バーヒータが脚光をあびている。

このたび、国産最大級の誘導加熱式バーヒータを開発し、1号機を日産自動車に納入して好調稼働中であり、引き続いて2号機を川田鉄工所に納入したので、以下に概要を説明する。

2. 加熱仕様と電源設備

2.1 加熱仕様

このバーヒータの加熱仕様を下記する。

- (a) 素材材質 炭素鋼
- (b) 素材寸法 60~38 mmφ×2.5~6 m 長さ
- (c) 加熱温度 1,250°C
- (d) 加熱能力 8.0 t/h(60φについて)
- (e) 送り速度 約10 m/min

2.2 定格

2.1節の加熱仕様に対して、定格は以下のとおりである。

- (a) 加熱機定格
 - 50 Hz, 6.0 kV, 三相, 1,400 kW
 - 2.5 kHz, 800 V, 一相, 1,800 kW
 - 2.5 kHz, 800 V, 一相, 300 kW
- (b) 高周波発電機定格
 - 2.5 kHz, 800 V, 一相, 600 kVA……3台
 - 2.5 kHz, 800 V, 一相, 300 kVA……1台

2.3 機器の構成

このバーヒータは下記の機器によって構成されている。

- (1) 加熱装置
 - ED-BR 3 形加熱機
 - 加熱機操作盤

- 加熱機制御盤
- 材料自動供給装置
- (2) 低周波電源設備
 - 電源制御盤
 - コンデンサ 盤
- (3) 高周波電源設備

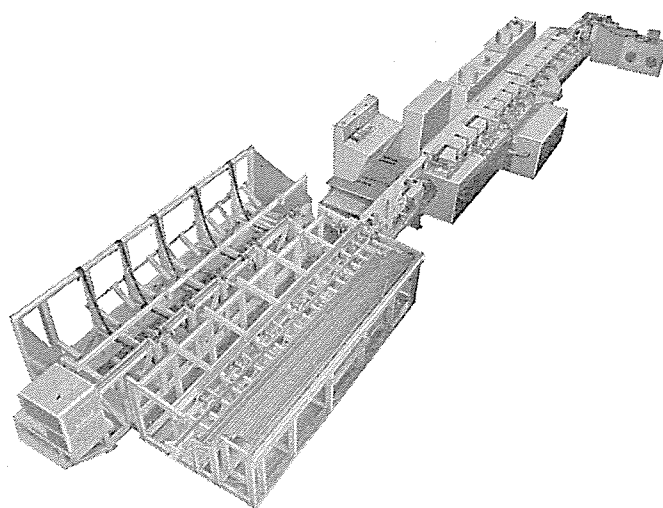


図 2.1 大容量バーヒータ
Large capacity induction bar heater.

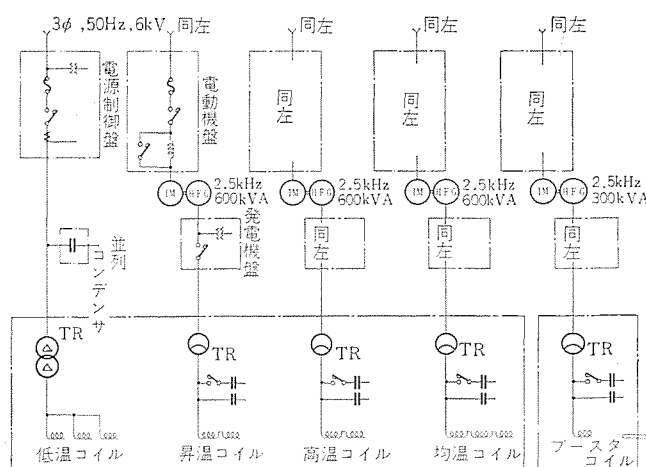


図 2.2 単線結線
Single line diagram.

誘導電動式高周波発電機

電動機盤

起動盤

発電機盤

電源制御盤

加熱装置の外形を図 2. 1 に示す。

2. 4 二重周波加熱

バーヒータの電気系統を図 2. 2 に示す。

このヒータの特長の一つとして、常温から 600~700°C までの加熱を 50 Hz 商用周波電力で、これ以上 1,250°C までを 2.5 kHz 高周波電力で加熱する、いわゆる二重周波方式を採用していることがあげられる。

低温コイルの加熱電源として 50 Hz の商用周波電源を使ったのは、材料径が 100mm 以上についてはこれまで数台の実績があるが、今回のように 60~38 mmφ という常識からいえば小径にすぎる材料に対しては初めての試みである。商用周波電源をそのまま使うことにより、周波数変換損失がないために電源側からみた総合効率を上昇させ得ること、径方向の均熱化に寄与することおよび経済性の点から商用周波数電源を採用した。

2. 5 低周波電源設備

50 Hz, 三相, 6.0 kV 入力を得て、三相の電力を加熱コイルに印加する方式として、三相平衡負荷にしている。このため、単相加熱に必要なとされる三相平衡装置は不要であり、構成機器の削減に役立っている。

電源変圧器は、一次 6.0 kV を加熱最適電圧 (約 200 V) に降圧するもので、3,600 kVA の容量を有している。この変圧器は、誘導加熱用としてとくに開発されたもので、送油水冷式として信頼性向上と小形化を図っている。変圧器の一次側には、回路力率を改善する並列コンデンサを設けている。回路の開閉は、高圧気中電磁接触器で行ない、短絡保護用に CLS 形電力ヒューズを使用している。

2. 6 高周波電源設備

50 Hz, 6.0 kV 入力を 2.5 kHz, 800 V の高周波に変換するため、誘導電動式高周波発電機(MG)を使用している。MG は、2.5 kHz, 600 kVA 3 台と 300 kVA 1 台を使用し、それぞれ昇温コイル・高温コイル・均温コイル・プースタコイルに電力を供給している。

4 台の MG は、それぞれ単独運転とすることにより、並列運転よりも保守ならびに操作を容易にしている。

高周波出力回路の開閉は、高周波用気中コンタクトで行ない、コンパクトな水冷式高周波変圧器によって最適加熱電圧の設定ができる。MG の出力を有効に利用するため、加熱コイルに並列に、ポリプロピレンフィルムを使用した $\tan \delta$ 損の少ない高周波コンデンサを設置し、回路力率を 100 % に改善している。運転当初および終了時の力率の変動に対しては、自動力率調整装置によってコンデンサ容量調整用コンタクトを自動開閉している。

したがって、高周波回路の操作は、電源入りおよびバー材サイズに応じた電圧ボリューム調整だけであるため、非常に簡単である。

3. 加熱特性

3. 1 昇温カーブ

50 φ 加熱時の昇温カーブと使用電力の一例を図 3. 1 に示す。商用周波電力が供給される低温コイル出口で 650°C に加熱され、2.5 kHz 高周波電力が供給される昇温・高温コイルで 1,100°C まで加熱され

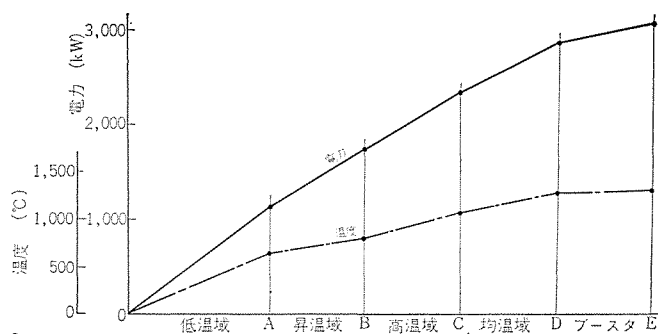


図 3. 1 加熱特性例
Example of heating characteristics.

る。均温コイル出口で 1,250°C まで加熱され、加熱昇温と同時に径方向の均熱化も図っている。

3. 2 プースタコイル

均温コイルを出たバー材は、ホーマのピンチローラにかみ込まれてホーマのカッタに強制的に送り込まれるが、このピンチローラは水冷されているため、この部分でのバー材の表面温度低下が著しいこと、および均温コイルからカッタまでの間では放冷されているため、カッタ部では 1,100~1,200°C の温度になる。この温度では、ホーマの金型の寿命が短くなり、好ましくない。そこで、この温度低下を補うため、ホーマのピンチローラとカッタとの間の限られたスペースを利用してプースタコイルを設けている。

このプースタコイルで、バー材表面温度を 1,250~1,280°C まで昇温させることにより、型の寿命を延ばすとともに製品の歩どまりをあげている。このコイルは、短時間で急速加熱するので、バー材の停滞は、溶融事故につながるため瞬時に電源をトリップさせるようにしている。

4. 加熱装置

4. 1 材料供給装置

材料供給装置は、ローダとバーラックとからできており、これらの装置は加熱装置側の要求に応じて材料を自動的に供給する装置である。すなわち 2~3 トンに結束された材料は、クレーンでローダに供給され、ストックされる。

このローダは、今回のバーヒータのために開発されたもので、ストック部分での材料のからみがなく、自動的に確実に、しかも静かにフィードできる特長を有している。

ローダから取り出された材料は、バーラックに供給される。バーラックは、ローダから供給された材料を 1 段に整列ストックさせる部分と、加熱コイルに材料を搬入するためのフィードローラ、それにホーマ側からリターンされた端材をストックするためのエプロンから構成されている。ストック部では、一番先頭の材料から順次キックで確実にキックアウトされ、フィードローラ上に載せられて加熱コイル側に供給される。このようにして、材料供給装置は、材料をローダ部にチャージするだけで、あとはいっさい人手を要せず、安全・確実に材料を供給・搬送する装置である。

4. 2 材料送り装置

フィードローラより搬送された材料は、ピンチローラにかみ込まれる。ピンチローラは、材料をピンチして搬送に必要な推力を与え、しかも所定の送り速度、すなわち加熱処理スピードで確実に加熱コイルへ、さらにホーマピンチローラへと材料を送る。加熱コイルの間には中間ローラを設置してあり、これは材料を加熱コイルの耐火物に接触させず

にうまく通過させるための誘導ローラである。

4.3 整合箱

加熱コイルや中間ローラを設置している架台の内部には、50 Hz 電源用の整合変圧器、2.5 kHz 用整合変圧器、高周波コンデンサの電気機器を収納してあり、これを整合箱と称している。

整合箱の外部には、給水ヘッド・排水受、それに整合箱内部を冷却するための冷却ファンが取り付けられている。なお、整合箱は輸送の関係で分割されているが、ホーマ側の整合箱はホーマの点検、短尺材料（リターンできないもの）の取出しのためにボタン操作で旋回できるようにになっている。

4.4 加熱コイル

加熱コイルは、60 Hz 電源を使用した低温コイル、2.5 kHz 電源を使用した昇温コイル・高温コイル・均温コイルとそれぞれ数ブロック、お

よびプースタコイル1ブロックより構成され、全長は約10 m と短い。

均温コイルとプースタコイル部には、被加熱材の温度が高いため、耐火材保護と、送りを確実にするためとで水冷されたスキッドレールが設けられている。加熱コイルの取付け・取りはずしは至極簡単で、所定の位置にガイドを通じて戴せるだけで位置決めができる構造になっている。なお、各加熱コイル間にはスケール受皿を設けてあり、スケールの処置がしやすく、飛散防止にも役立っている。

5. む す び

以上、国産初の大容量バーヒータについてその概要を述べた。バーヒータの用途は、フォーム用以外に熱処理用に、あるいは大容量熱間加工に適用可能であり、今後、この技術をさらに応用してゆきたい。



金属材料の冷却水による腐食

田 辺 愈*・市田 行則*

山 本 利雄**・光 本 誠***

山 内 敦*・森 章文*・川 中 進*

Corrosion of Metals in Cooling Water

Tokyo Electric Power Co., Inc. Masaru TANABE・Yukinori ICHIDA

Mitsubishi Electric Corp., Manufacturing Development Laboratory Toshio YAMAMOTO・Seiichi MITSUMOTO

Mitsubishi Electric Corp., Itami Works Atsushi YAMAUCHI・Akihumi MORI・Susumu KAWANAKA

Cooling water devices for transformers in underground substations in the basement of buildings in the heart of city call for overall reliability and economy with the water system, oil system and accessories included together. A joint study has been made by Tokyo Electric Power and Mitsubishi, of the items referred to, the relation between the water quality for transformer cooling and the corrosion of metals used for the installations so as to improve future design to aim at a goal and also to form standards for the control of water quality and its maintenance. As a result, quality of cooling water now in use is made clear and degree of corrosion of various metals is made known, thus sufficient information being obtained on basic knowledge by formulas sought for cooling quantity vs. quality, temperature and velocity of water. According to the information, Mitsubishi standard heat exchangers are anticipated to last more than thirty years when practical water quality is considered.

1. ま え が き

都心のビル等地下に設置される地下変電所用変圧器の冷却装置は、水系統、油系統、付属部品等を含め総合的な信頼性が要求されるが、今度そのうちとくに、変圧器用冷却装置に対する水質と使用金属材料の腐食との関係を明らかにし、経済的かつ高信頼度のある冷却装置を設計すると共に、適正な水質管理と保守基準を作成するためこのたび東京電力(株)と共同研究を行なった。以下この一連の研究、実験結果について報告する。

(1) 現地腐食試験

都内、6ヵ所の地下変電所において冷却塔内に冷却器用材料の試験片を設置して腐食状況を調べる。

(2) 水質分析

実際に使用されている冷却水の水質をは握するために、上記腐食試験を行なう各変電所の冷却水(補給水、循環水)を定期的に採取し、導電率、pH、全硬度、M-アルカリ度、シリカ、塩素イオン、硫酸イオン、全鉄、アンモニウムイオン、イオウイオン、の分析を行なう。

(3) 水質管理に関連のある測定、記録

上記6変電所における補給水量、ブロー量、冷却塔の清掃時期、水温、循環水量、その他関連する事項を測定し、記録する。

(4) 実験室腐食試験

現地における水質分析の結果から、循環水に近い水質の合成水を作り、冷却系統を模擬した腐食ループで上記(1)項と同じ、冷却器用材料の腐食と温度、流速、水質の影響を調べる。

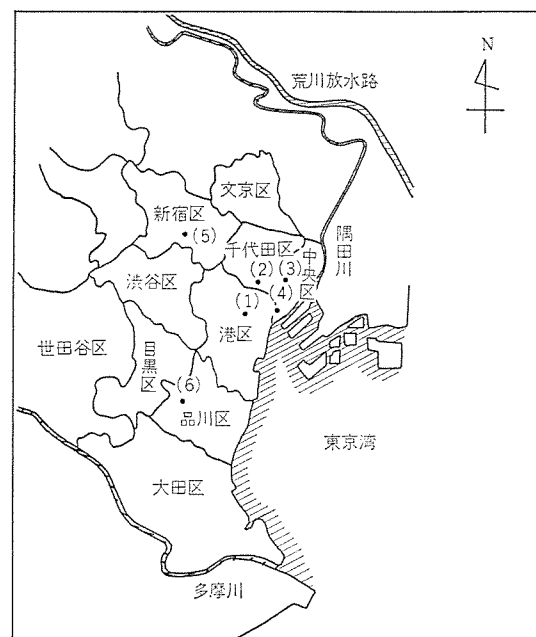
これらの実験は季節的变化も考慮し、45年3月より1年間にわたって行なわれた。また冷却器用材料としては、現在水冷式熱交換器として冷却水側に標準的に使用されている、脱酸銅(冷却管)、ネーパル黄銅(管板)、亜鉛メッキ銅(水室)、とともに従来から特殊的に使用される、キュプロニッケル、アルミ黄銅、ステンレス鋼、軟鋼、鋳鉄、アルミニウムについても行なった。

2. 実験方法

2.1 現地腐食試験

試験場所は、図2.1に示す6ヵ所の変電所(変電所名をA, B, C, D, E, Fと称す)で、そのおのおのの冷却塔内水中および水滴のかかる気中に腐食試験片を設置した。各変電所の周囲状況および試片設置位置などの試験条件を表2.1にまとめた。

試験片は表2.2に示す9種の材料で厚さ3mm、直径50mmの円板で中央に直径12mmの穴をあけた形状に仕上げ、各試片間はテフロンスペーサで絶縁した。脱脂は、トリクレンで行ない表中、亜鉛引



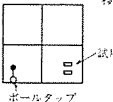
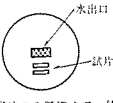
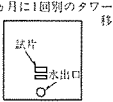
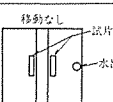
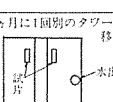
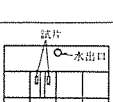
変電所名 (1) A (2) B (3) C (4) D (5) E (6) F

図 2.1 現地試験の試験場所(・印で示す)
Field corrosion test sites in Tokyo.

き鋼とアルミニウムを除く7種の材料では、試験片おのおの2枚を1セットとして春(3～5月)、夏(6～8月)、秋(9～11月)、冬(12～2月)の各3ヵ月間水中に放置するものおよび水中と水滴のかかる所にそれぞれ1年間放置するものの6セットを各変電所に定期的に設置し回収後、表面観察と腐食減量の測定を行なった。なお途中で追加試験としてアルミニウム、亜鉛引き鋼、軟鋼の試験片をおのおの2枚で、1セットとし9ヵ月間、水中および水滴のかかる気中に放置した。

腐食減量は、表2.3に示す方法により腐食生成物を除去し試験後の重量を測定し、試験前の重量との差から求めた。

表 2.1 試験片設置場所および周囲情况
Immersion sites in cooling tower and surroundings.

内容 変電所	冷却塔の 位置(高さm)	冷却塔の 形式および 清音装置 の有無	冷却塔の水槽 試験片設置位置	その他 (1)腐食抑制剤 (2)フィルタ (3)環境など
A	10階建ビル 屋上 (約50m)	なし 自噴式	2ヵ月に1回別のタワーへ 移動 	(1)腐食抑制剤使用せず。 (2)なし (3)ビル街
B	地下 (地上より 空気吸入)	あり 強制 風冷式		(1)44年4月から効果なしと見て プレローケンの使用をやめた。(最終43年3月) (2)空気フィルタあり。 (3)官庁ビル街
C	屋上 (25～30)	あり 強制 風冷式	2ヵ月に1回別のタワーへ 移動 	(1)44年3月にプレローケンを 投入(6kg)以後停止。 (2)なし (3)高層ビル街
D	1階 (1～3m)	あり 強制 風冷式	移動なし 	(1)44年9月にアクアクリアを 投入(1.8l)以後停止 (2)空気フィルタあり。 (3)空気吸入口近くが自動車 道路に面している。
E	屋上 (10m)	あり 強制 風冷式	2ヵ月に1回別のタワーへ 移動 	(1)腐食抑制剤使用せず。 (2)なし (3)ビル街 補給水に塩素臭あり。
F	屋上 (13m)	なし 自噴式		(1)腐食抑制剤使用せず。 (2)なし (3)住宅、商店街 わたばこりが多い。

また、局所的な侵食深さは、重量測定後の試片について金属顕微鏡で測定した。この測定は1枚の試験片で深いと考えられる局所的な侵食部を2～3ヵ所選んで行ない2枚の試験片で最も大きい値をとった。一部の試験片については、断面で侵食の様子を観察し深さを測定した。

2.2 水質分析

腐食試験片を設置または、回収する際(45年3月、6月、9月、12月、46年3月)に各変電所の補給水、循環水を探取し、導電率、pH、全硬度、M-アルカリ度、塩素イオン、硫酸イオン、シリカ、アンモニウムイオン、全鉄、銅イオンについて分析した。水質分析は、JIS K 0101(工業用水試験方法)に準ずる方法によって行なった。

2.3 冷却系統管理上の記録

循環水の水質を管理する方法を明らかにするため、各変電所において補給水量、水交換時期、交換水量、冷却塔の清掃時期、水温、循環水量等につき調査および測定を行なった。

2.4 実験室での腐食試験

腐食試験装置の外観と原理を図2.2に示す。

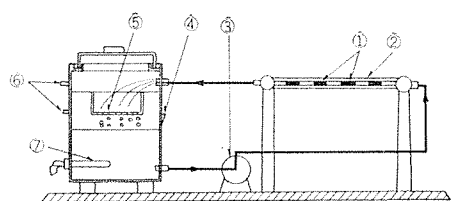
この装置では、合成水($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 0.166 g/l, Na_2SO_4 , 0.355 g/l, NaHCO_3 , 0.0652 g/l ($\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0.00184 g/l)を60 l入れ、7日ごとに新しい合成水と交換して水温、流速と腐食との関係について調べた。試験期間は、3ヵ月であり、中間に試片を取り出し腐食減量の時間変化を調べた。試験片は表2.2のアルミニウム、鋳鉄、溶融亜鉛メッキ鋼を除く6種の材料について厚さ1 mm、幅11 mm、長さ80 mmの板状に加工したものをトリクレンで脱脂して使用した。

表 2.3 各種金属の腐食生成物除去法
Descaling procedures.

料 料	洗 淨 液	洗 淨 条 件
脱酸銅 ネーバル黄銅 キュプロニッケル アルミ黄銅 ステンレス鋼 軟鋼 鋳鉄	インヒビータ入り酸洗液	60°C 3分浸漬後スポンジた わしで水洗し、さらに、室温 で10分浸漬
溶融亜鉛、メッキ鋼	NH_4Cl 10% 水溶液	75°C 10分浸漬
アルミニウム	CrO_3 20 g/l 水 H_3PO_4 (85%) 35 ml/l 水	沸騰液中 5分浸漬

表 2.2 試験片の材質 Composition of specimen.

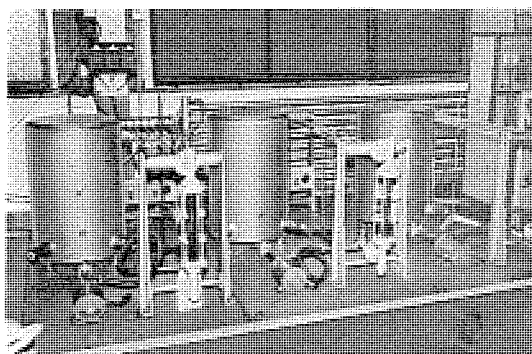
材 料 名	J I S 相当記号	公 称 組 成 (wt %) () 内分析値													備 考
		Cu	Al	Fe	Ni	Zn	Sn	Si	Pb	Mn	P	S	C	As	
脱酸銅	DCuP1	99.9 以上									0.004~ 0.04				
ネーバル 黄銅	NBSP2	59~62 (61.1)		0.1 以下		残 部	0.5~1.0 (0.49)		0.2 以下						
キュプロ ニッケル	CNTF1	残 部			9~11 (10.36)	1 以下 (0.42)				(0.17)		(0.08)			
アルミ 黄銅	SsTF3	76~80 (77.52)	1.8~2.5 (1.96)	0.06 以下 (0.01)	0.2~1 (0.23)	残 部			0.07 以下 (Tr)	0.2 以下 (Tr)				0.03~0.1 (0.05)	
ステンレ ス鋼	SUS27			残 部	8~11			1 以下		2 以下	0.04 以下	0.03 以下	0.08 以下		Cr18~20
軟 鋼	SS41			残 部							0.5 以下	0.5 以下	0.12~0.2 (0.18)		
鋳 鉄	FC15			残 部				(1.45)			0.5 以下	0.5 以下	(2.94)		
亜鉛メッキ 鋼	—														溶融亜鉛 メッキ
アルミ ウ	AlP3	0.2 以下	99 以上	1 以下		0.1 以下		1 以下		0.05 以下					



腐食ループ試験装置

- ①試験片
- ②テフロンチューブ
- ③循環ポンプ（プラスチック製）
- ④水タンク（容量60ℓステンレス製）
- ⑤多孔板
- ⑥空気出入口
- ⑦ヒータ

(a)



(b)

図 2.2 腐食試験ループ
Corrosion test loop.

2.5 腐食率の求め方

現地試験，実験室試験ともに腐食減量から次式によって腐食率を算出した。

$$W = \frac{\Delta w}{At} \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし， W：腐食率 (mg/dm²/day)

Δw ：腐食減量 (mg)

A：試験片表面積 (dm²)

t：試験時間 (day)

冷却器の腐食による寿命は局部腐食に影響されることが多いが，

これについては後述する。

3. 現地腐食試験の結果

3.1 変電所における冷却システム管理上の記録

6カ所の変電所で，冷却システムを管理するために測定し，材料の腐食と水質に関連する項目について記録した結果を表 3.1 に示す。図 3.1 に水温の季節的な変化を示す。D は年間平均水温が最高で F は最低であり，平均すると 20°C 前後である。

3.2 冷却水の水質分析結果

45年3月から46年3月までの試験期間中に6カ所の変電所で採水した補給水および循環水の分析結果を表 3.2 および表 3.3 に示

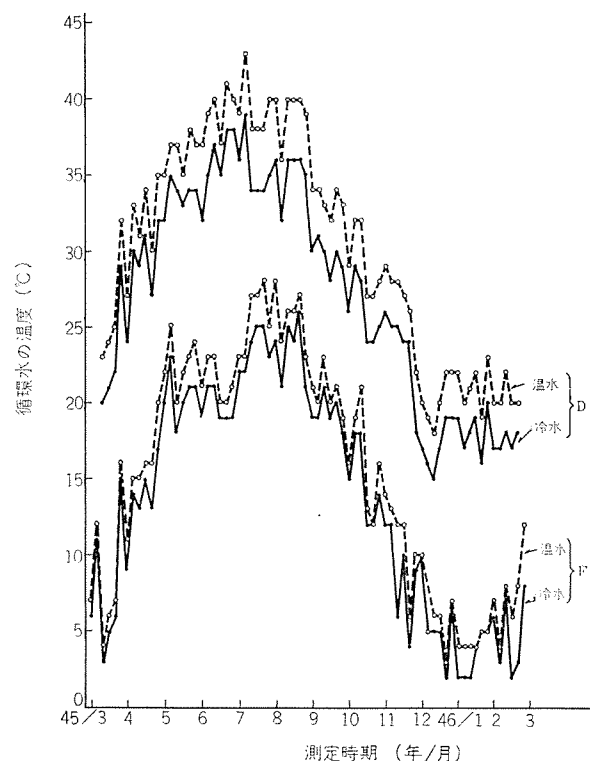


図 3.1 循環水の水温
Temperature of the cooling water.

表 3.1 水質管理の状況 (各変電所とも水処理剤を使用していない)
Conditions of cooling water control.

変電所名	A	B	C	D	E ²⁾	F
変圧器容量 (MVA)	2×45 3×10	2×45 3×10	3×150 3×45	2×45 3×10	2×150 3×10	2×100
冷却塔形式 (設置位置)	自噴式 (約50mビル屋上)	強制風冷式 (地下1階)	強制風冷式 (25~30mビル屋上)	強制風冷式 (1階屋内)	強制風冷式 (10mビル屋上)	自噴式 (13mビル屋上)
補給水量 ¹⁾ (m ³ /年)	1,050	2,500	10,400	4,400	4,500	2,100
循環水量 (ℓ/min)	630	620	3,900	1,200~1,400	3,200	1,700~2,680
年間平均水温	冷水 (°C)	20.5	20.1	27.2	19.8	13.8
	温水 (°C)	23.9	22.3	20.5	30.4	22.5
タワー水交換量 (m ³ /年)	—	32.2	210	968	570	—
交換回数 (回/年)	(オーバーフロー)	23	14	23	20	(オーバーフロー 9月より水交換13回)
クーリングタワーの清掃	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月	1回/3ヵ月
濃縮率 ³⁾ (平均値)	1.8	12	6.6	2.8	7.6	2.7
補給水量測定方法	冷却システム専用の量水 計で補給水量測定	冷却システム専用の量水 計で補給水量測定	変電所専用の量水計 で飲水その他雑用水 も一部含む使用水量	変電所専用のメータ から雑用水用の子メ ータの差引計算で補 給水量を求めた	補給水ポンプ動作カ ウンタにより補給水 量を求めた	冷却システム専用の量水 計により補給水量を 測定

注 1) データの欠けている月は推定値で補正した。

2) 45年12月~46年2月の記録を入手していないため，45年3月~11月の状況，他の変電所の状況から判断して推定した。

3) 循環水中の塩素系イオン濃度平均値と補給水中の塩素系イオン濃度平均値の比として求めた。

表 3.2 (a) 補給水の水質分析結果

Analysis data of supply water.

45年3月, 6月, 9月, 12月, 46年3月の5回の分析値の平均および範囲

分析項目	A		B		C		D		E		F	
	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均
水素イオン濃度指数 pH	7.05~7.8	7.17	6.9~7.5	7.22	6.4~7.6	7.04	6.5~8.1	7.41	6.5~7.6	7.15	6.3~7.9	7.26
電 導 度 (μ mho/cm)	106.6~292	190	168.5~250	221	91~211	166	122.5~266	190	164~295	223	181~312	246
全 硬 度* (CaCO_3 ppm)	42~54	46.7	56~70	64	44~66	54.7	48~60	54.7	58~66	62	62~70	67.3
M-アルカリ度 (CaCO_3 ppm)	22~40	30.2	22~35	29.6	29~35	32.0	29~39	32.6	23~40	31.4	25~42	33.4
Cl^- (ppm)	8~22	14.7	9~25	18.2	9~24	13.8	12~21	15.8	18~20	19.0	18~26	21.4
SO_4^{2-} (ppm)	9.5~39	25.7	19~43	34.2	17.5~35	24.8	20.5~35	26.0	31~42	36.6	38~45.5	41.7
SiO_2^* (ppm)	12.5~16	13.5	12.5~16	14.2	10~16	12.8	11~14	13.0	12~15	13.5	14.5~17	15.8
NH_4^{+*} (ppm)	0.00~0.02	0.01	0.06~0.07	0.065	0.00~0.02	0.01	0.02~0.03	0.025	0.00~0.06	0.03	0.00	0.00
全 鉄* (ppm)	0.025~0.030	0.028	0.14~0.50	0.313	0.02~0.07	0.062	0.03~0.13	0.095	0.01~0.06	0.028	0.01~0.02	0.013
Cu^{2+*} (ppm)	—	0.005	—	0.014	—	0.0075	—	0.0155	—	0.014	—	0.010

(注) * 印の分析項目については, 分析回数3回以下である。

なお C, D では1ヵ月に1回採水し, Cl^- , pH, 電導度について分析, 測定した。表にはこの値も含む。

(b) 循環水の水質分析結果

Analysis data of circulating water.

45年3月, 6月, 9月, 12月, 46年3月の5回の分析値の平均および範囲

分析項目	A		B		C		D		E		F	
	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	平 均
水素イオン濃度指数 pH	6.6~9.5	7.82	6.3~8.2	7.65	6.1~7.5	6.81	6.75~8.1	7.60	6.9~8.2	7.30	7.2~7.9	7.74
電 導 度 (μ mho/cm)	157~446	308	1,350~3,700	2,231	609~1,440	1,050	338~851	581	451~3,130	1,213	341~1,075	661
全 硬 度* (CaCO_3 ppm)	76~116	96	550~960	757	276~480	384	136~194	167	208~900	440	168~236	195
M-アルカリ度 (CaCO_3 ppm)	27~78	44.4	102~121	113	2~32	12.6	48~130	73.8	20~155	52.4	43~65	55.6
Cl^- (ppm)	16~44	26.2	106~298	213	47~128	91	32~57	44.3	54~270	145	35~90	57.2
SO_4^{2-} (ppm)	34~68	52.4	310~912	628	180~512	324	78~114	98.3	158~900	456	110~264	160
SiO_2^* (ppm)	5~20	14.8	108~120	113	34~47	41	40~62	50.0	34~84	52	32~45	37
NH_4^{+*} (ppm)	0.00~0.02	0.01	0.01~0.03	0.02	0.00~0.26	0.13	0.00	0.00	0.02~0.22	0.12	0.01~0.02	0.015
全 鉄* (ppm)	0.01~0.32	0.15	0.02~0.07	0.04	0.02~0.05	0.034	0.01~0.15	0.06	0.03~0.06	0.042	0.03~0.095	0.072
Cu^{2+*} (ppm)	—	0.014	—	0.014	—	0.050	—	0.025	—	0.029	—	0.038

(注) * 印の分析項目については分析回数3回以下である。

なお C, D では1ヵ月に1回採水し, pH, 電導度について分析, 測定した。表にはこの値も含む。

す。補給水では変電所, 採水時期による各成分の変動が比較的小さい。しかし, 循環水は濃縮して塩素イオン, 硫酸イオン, 硬度成分の濃度が著しく大きくなることがある。これに対して M-アルカリ度(炭酸塩など), シリカは, あまり濃縮しない傾向がみられる。次の式で定義される塩素イオン濃縮倍数 N の時間的変化を図 3.2 に示す。

$$N = (\text{循環水の塩素イオン濃度}) / (\text{補給水の塩素イオン濃度})$$

オーパフローにより連続的にフローを行なった変電所(A・F)および定期的に多量のフローを行なった。Dでは, 濃縮倍数の変動が小さい。水交換が不定期なC, また, フロー量の少ないB, Eでは濃縮倍数が著しく大きくなることがある。

循環水が濃縮する際に大気中から亜硫酸ガスを吸収している状況を明らかにするため, 亜硫酸が酸化されて生成する硫酸イオンと塩

表 3.3 水質分析結果
Composition of test water.

分 析 項 目	補 給 水		循 環 水		標準合成分	
	範 囲	平 均	範 囲	平 均	範 囲	分析値
水素イオン指数(pH)	6.3~8.1	7.21	6.1~9.5	7.49	7.0~8.3	7.5
電導度 (μ mho/cm)	91~312	206	157~3,700	1,007	728~1,130	940
全硬度(CaCO_3 ppm)	42~70	58.2	76~960	340	—	102
M-アルカリ度 (CaCO_3 ppm)	22~42	31.5	2~121	58.6	—	52
Cl^- (ppm)	8~26	17.2	16~298	96.1	—	65
SO_4^{2-} (ppm)	12~45.5	31.5	34~912	286	—	250
SiO_2 (ppm)	10~17	13.8	5~120	51.3	—	5
NH_4^+ (ppm)	0.00~0.07	0.02	0.00~0.26	0.05	—	0.5
全 鉄 (ppm)	0.01~0.50	0.09	0.01~0.32	0.07	—	—
Cu^{2+} (ppm)	0.005~0.021	0.01	0.014~0.058	0.03	—	—
備 考	6ヵ所の変電所の水道水を試験期間中に分析した値の範囲と平均		6ヵ所の試片を設置した冷却塔内循環水を試験期間中に分析した値の範囲と平均		実験室で腐食試験を行なった標準合成分の分析値	

素イオンの割合を調べた。図 3. 3 に補給水と循環水についてこの比率を比較した。大気中からの吸収がなければ、補給水と循環水で硫酸イオン濃度と塩素イオン濃度の比率は等しいはずである。各変電所とも循環水の硫酸イオンの比率は、補給水より大きくなっている。

また、同様に M-アルカリ度についても塩素イオン濃度に対する比率を求め、循環水と補給水を比較した結果を図 3. 4 に示す。循環水の M-アルカリ度の比率は、補給水より小さくなる傾向が認められる。この結果は、循環水中に硫酸が混入したことを示すものであり、

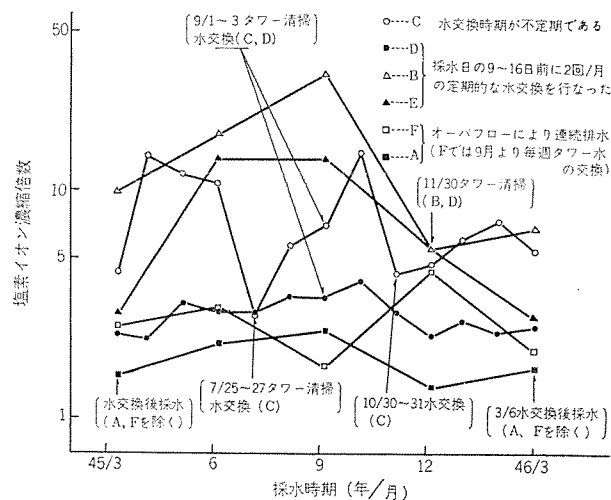
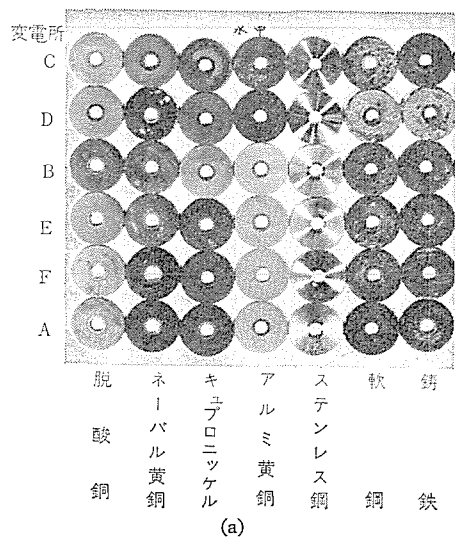
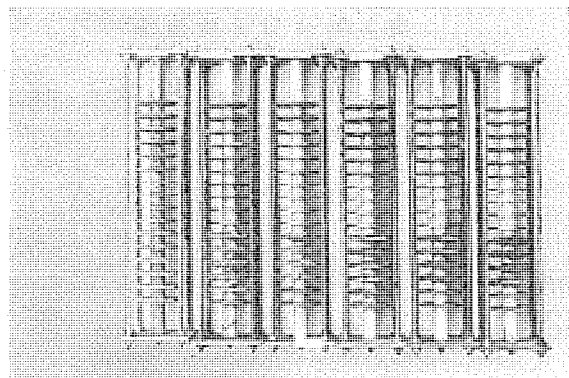


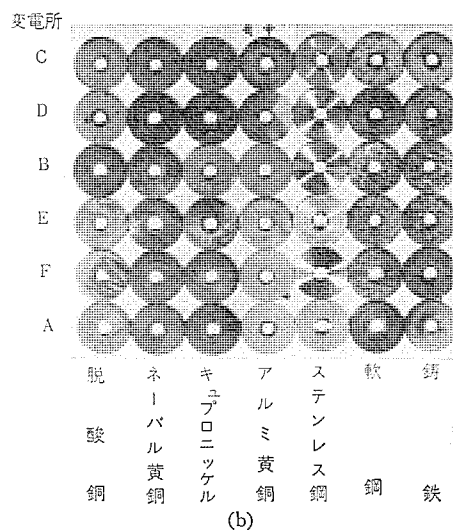
図 3. 2 循環水の濃縮 (循環水 Cl^- -ppm)/(補給水 Cl^- -ppm)
Concentration of circulating water (Cl^- -ppm in circulating water/ Cl^- -ppm in supply water).



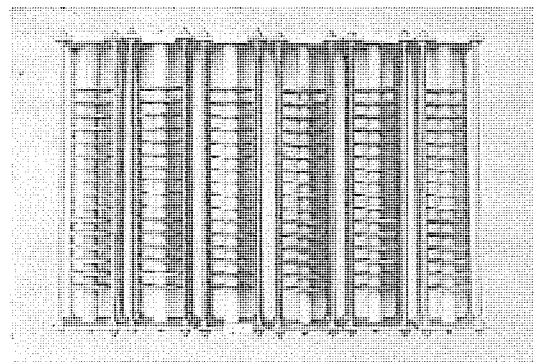
(a)



(c) 水 中



(b)



(d) 気 中

図 3. 5 回収した試験片
Corrosion specimens after test (a, b) and corrosion test rack (c, d).

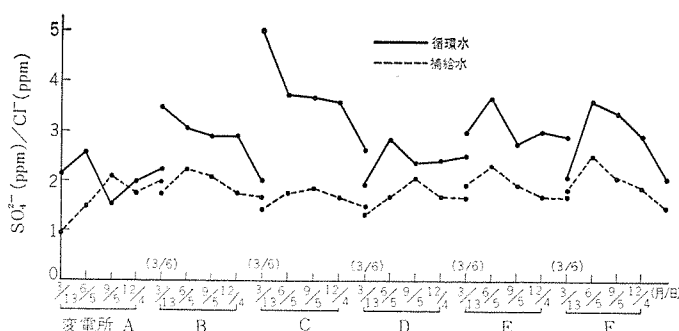


図 3. 3 冷却水の硫酸イオンと塩素イオンの比率
Ratio of sulphate-ion concentration to chloride-ion concentration of cooling water.

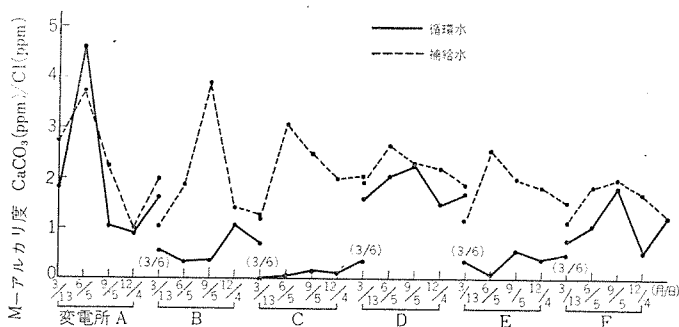


図 3. 4 冷却水のアルカリ度と Cl^- 濃度の比率
Ratio of alkalinity to chloride-ion concentration of cooling water

表 3.4 腐食試験片の外観(冷却塔水中1年間放置, *印は9ヵ月放置)
Visual appearance of specimens after immersion in circulating water of cooling tower for 12 months. (* 9 months)

材 料		脱 酸 銅	ネ ー バ ル 銅	キ ニ ュ ッ プ ケ ロ ル	ア プ ル ラ ミ ス	ス テ ン レ ス 銅	軟 銅	鋳 鉄	亜 鉛 メ ッ キ*	ア ル ミ ニ ウ ム*
場 所										
C	黄褐色 すきま腐食	黒い黄褐色	赤褐色部と黒い 黄褐色部 混在	黄褐色 白～淡緑色の腐 食部	黄色付着物	小さい点状のさ び	軟銅よりやや黒 い	やや黄色の付着 物	白, 褐色の点状 腐食 素地は黒褐色	
D	赤褐色 すきま腐食大	黒 色 白い点状の腐食	黒い黄褐色	灰 色	光沢良	全面に黄褐色の 付着物とさび	軟銅と同じ	やや黒い素地に 白色部が点在	同上の素地に点 が集合したよう な腐食	
B	黒褐色	黄銅色やや黒い	もとの色に近い すきま部 褐 色	淡黄色 すきま部が黒～ 褐色	少し光沢減少	部分的に点状の さび すきま 腐 食大	軟銅よりやや黒 く, さびが大き い	全体に白い部分 が多い	点状腐食少 すきま腐食大	
E	赤褐色	灰 色 白い点状の腐食	黒褐色	黄 色	少し光沢減少	部分的に大きな さび	ややさびが小さ く全面に分布	黒色の素地に白 色部が点在	点状腐食すきま 腐食ともに大 素地は黒色	
F	やや赤味のある 黄褐色	黒色部 赤褐色部が混在	灰 色	淡黄色	少し光沢減少	部分的に大きな さび 全体に黒い	ほぼ全面にさび	やや黒い素地に 白色の模様	変色少 すきま腐食	
A	やや赤味のある 黄褐色	黒 色	灰 色	淡黄色 すきま部 黒	少し光沢減少	全面黒色 すきま部が特に 黒い	ほぼ全面に黒色 点状のさびが分 布	やや黒い素地に 白色の模様	点状腐食 すきま腐食 素地黒褐色	

大気中の亜硫酸ガスを吸収していると推定される。Cでは、45年3月～6月に特に硫酸イオンの比率が多く、M-アルカリ度が2～3ppmに減少し、亜硫酸ガスを著しく吸収したと考えられる。これに対し濃縮倍数の小さいAでは、亜硫酸ガスを吸収する傾向はあまり顕著に現われていない。

3.3 腐食試験結果

冷却塔の水中に1年間放置した試験片を図3.5に示す。これらの観察結果を表3.4にまとめた。初期に亜硫酸ガスの吸収が多かったと考えられるCでは、試験片、テフロンペーサへの黄色の付着物が多く、キュープロニッケルにニッケルが選択的に溶出する選択腐食がみら

れ、またアルミ黄銅にも脱亜鉛現象がみられた。Dではネーバル黄銅に孔食が認められ、特に軟銅、鋳鉄が異常に腐食している。

腐食減量を測定して求めた腐食率を表3.5に示す。また、試験期間3ヵ月で春(3～5月), 夏(6～8月), 秋(9～11月), 冬(12～2月)の4回の試験の平均値を表3.6に示す。表3.5, と3.6を比較して明らかなように、長期の試験では短期の試験よりも各材料とも腐食率が減少している。試験期間3ヵ月の腐食試験で、腐食減量の季節による相違を比較してみると図3.6および図3.7のようになる。

Cでは、春～夏の期間中に脱酸銅、ネーバル黄銅、キュープロニッケル、ア

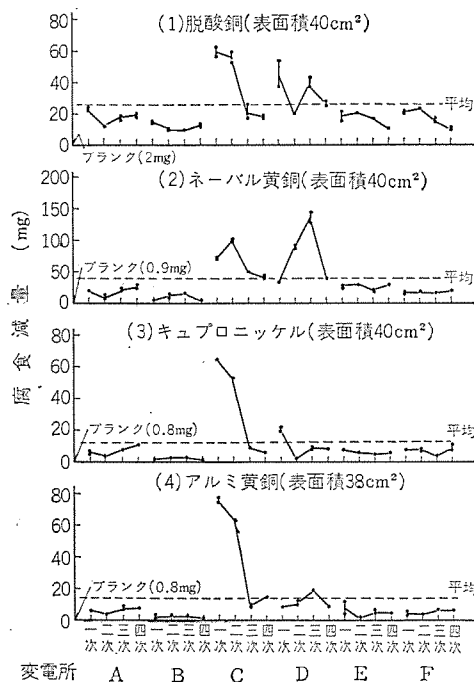


図 3.6 3ヵ月間の試験による腐食減量
(一次 3/13～6/5, 二次 6/5～9/5,
三次 9/5～12/4, 四次 12/4～3/6)

Descalced weight change of specimens exposed to circulating water in cooling tower for three months.
(1) Deoxidized copper, (2) Naval brass, (3) Cupronickel (10 % Ni), (4) Aluminum brass.

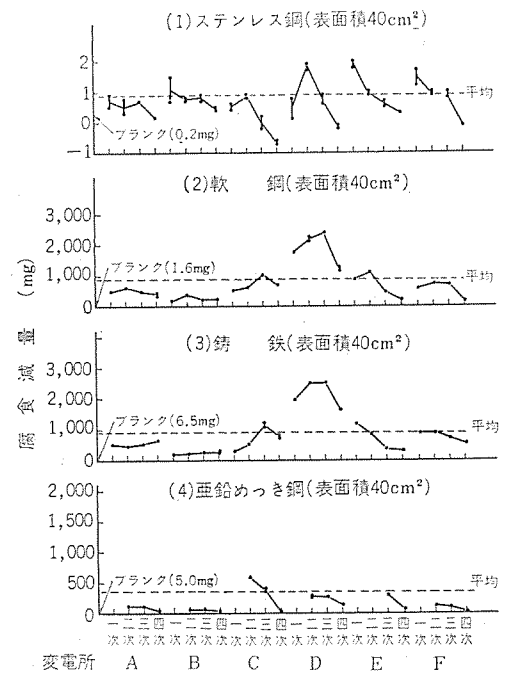


図 3.7 3ヵ月間の試験による腐食減量
(一次 3/13～6/5, 二次 6/5～9/5,
三次 9/5～12/4, 四次 12/4～3/6)

Descalced weight change of specimens exposed to circulating water in cooling tower for three months.
(1) Stainless steel, (2) Mild steel, (3) Cast iron, (4) Galvanized steel (hot-dip).

表 3.5 重量法による冷却器材料の腐食率
Weight loss of the specimens after one year exposures.

単位 $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ (mdd)

試験場所	材料	脱酸銅	ネーパル銅	キューブロニッケル	アルミ銅	ステンレス鋼	軟銅	鋳鉄	亜鉛メッキ鋼	軟銅	アルミニウム
水 中 12ヵ月	A	0.431	0.434	0.366	0.083	0.023	8.72	7.15	0.726	6.94	0.942
	B	0.166	0.108	0.059	0.059	0.007	4.68	4.29	0.246	6.93	0.533
	C	1.018	1.354	1.139	0.872	0.022	8.75	4.60	1.82	11.41	2.26
	D	0.563	1.316	0.537	0.313	0.009	27.8	26.7	1.55	38.1	6.49
	E	0.309	0.521	0.328	0.093	0.019	11.43	11.36	2.36	11.8	3.02
	F	0.323	0.357	0.278	0.046	0.015	9.70	11.52	0.876	9.48	0.912
	平均	0.468	0.682	0.451	0.246	0.016	11.84	10.94	1.263	14.11	2.360
気 中 12ヵ月	A	0.697	1.018	0.602	0.095	0.012	8.40	3.64	2.08	14.3	1.83
	B	0.247	0.095	0.041	0.022	0.009	4.24	2.94	1.00	3.62	0.994
	C	1.744	1.874	1.659	1.999	0.010	15.4	7.38	3.50	15.79	7.46
	D	1.058	0.822	0.384	0.269	0.005	9.86	2.77	2.75	16.52	4.83
	E	0.480	0.873	0.687	0.172	0.014	7.87	7.83	2.55	9.66	1.66
	F	0.520	0.437	0.371	0.059	0.009	5.89	5.12	1.63	11.46	1.62
	平均	0.791	0.853	0.624	0.436	0.010	8.61	4.95	2.25	11.89	3.066

※ 追加試験 期間 45年6月5日～46年3月6日 (9ヵ月)

表 3.6 4回の現地腐食試験での平均腐食率
Average weight loss of the specimens for four seasons test after three months exposures.

試験期間 3ヵ月 (45/3～6, 6～9, 9～12 12～46/3) 4回の試験の平均腐食率 単位 $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$

変電所	脱酸銅	ネーパル銅	キューブロニッケル	アルミ銅	軟銅	鋳鉄
A	0.511	0.565	0.205	0.192	13.9	15.2
B	0.344	0.197	0.0701	0.0741	7.4	6.49
C	1.10	1.85	1.03	1.25	20.1	20.0
D	0.932	2.06	0.321	0.358	53.3	60.0
E	0.467	0.775	0.180	0.155	18.9	19.4
F	0.496	0.514	0.192	0.144	15.7	22.4

表 3.7 局所的な腐食による最大侵食深さ
Maximum penetration depth of localized corrosion specimens.

(6ヵ所に各2枚配置した試片の深い侵食部を3～4箇所測定し最大値を示す)

試 験 条 件		腐 食 試 験 片 の 最 大 侵 食 深 さ (単位 mm)								
設置場所	試 験 期 間	脱 酸 銅	ネパール 銅	キュープロ ニッケル	アルミ 銅	ステンレス 銅	軟 銅	鋳 鉄	亜鉛メッキ 銅	アルミニウム
水 中	二次 (45. 6. 5～45. 9. 5)	0.018	0.010	0.014	0.038	—	0.042	0.070	—	—
	三次 (45. 9. 5～45. 12. 4)	0.042	0.038	0.010	0.040	0.016	0.130	0.121	0.030	—
	四次 (45. 12. 4～46. 3. 6)	0.148	0.060	0.134	0.088	0.074	0.286	0.186	0.028	—
	追加 (45. 6. 5～46. 3. 6)	—	—	—	—	—	0.546	—	0.03*	0.860
	年間 (45. 3. 13～46. 3. 6)	0.12*	0.036	0.06*	0.06*	0.006	1.00*	0.40*	—	—
気 中	追加 (45. 6. 5～46. 3. 6)	—	—	—	—	—	0.604	—	0.022	0.882
	年間 (45. 3. 13～46. 3. 6)	0.096	0.062	0.060	0.066	0.008	0.484	0.116	—	—
64年後の最大表面粗さ推定値**	水 中	0.92	0.38	0.85	0.56	0.47	4.0	1.6	0.19	3.8
	気 中	0.92	0.38	0.85	0.56	0.47	4.0	1.6	0.19	3.9

(注) * 断面の顕微鏡観察により測定した値であり、表面観察で測定された最大値より深い侵食がみられたものである。

** 侵食深さが試験時間の $\frac{1}{3}$ 乗に比例すると仮定して推定した値。(単位 mm) (各試験での最大値)

ルミ黄銅が著しく腐食しており、平均値の2～7倍の腐食減量になっている。またDで脱酸銅・ネーパル黄銅・軟銅・鋳鉄の腐食が著しいことは目立つ。また、濃縮倍数が著しく大きいBで、各種の金属の腐食減量が小さいことも注目される。冷却器の寿命を検討する上では、局所的な侵食に注意する必要がある。6ヵ所の変電所で最も大きい侵食深さを各材料について表3.7に示す。侵食深さは試験期間、変電所、季節により一定の傾向を求めることは困難である。ただ、各材料とも冬期の試験で大きな侵食深さとなっている。

冷却塔内水中に1年間放置した試験片の表面に生成、または付着した物質および冷却塔内の沈殿物、循環水蒸発残留物で1%程度含まれることのある主要成分を表3.8に示す。金属の表面に付着する物質は、冷却塔内の沈殿物とよく似た組成であり、Fe・Siは付着物、沈殿物に特に多く含有されている。これら付着物をX線回折により調査したが、いずれも非晶質であり、明りょうな回折線が得られなかった。また、赤外線吸収スペクトル分析では、いずれも水酸化物が認められたので、水酸化鉄・非晶質のシリカが主成分であり、結晶性の成分が微量であると推定される。

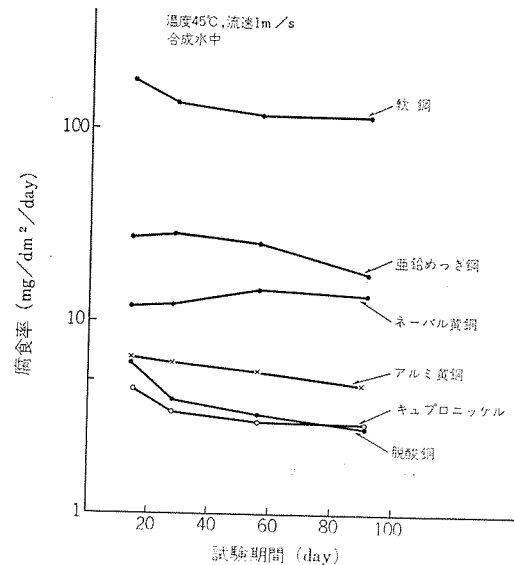


図 3.8 腐食率と試験時間の関係
Empirical relationship between corrosion rate of metals and time of immersion.
(Water temperature 45°C, velocity of flow 1 m/sec).

表 3.8 金属表面付着物の成分
Composition of corrosion scale.

主……………主成分
冊……………1%前後
冊……………0.1%前後
±……………0.01%
+……………0.001%
Tr……………痕跡程度
'……………よりやや多い
……………大体以上の見当

変電所	試料(成分元素)	A	B	C	D	E	F
軟銅表面の付着物	Fe	主	主	主	主	主	主
	Zn	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Cu	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Ca	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Al	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Si	冊	冊	冊	冊	冊	冊
亜鉛メッキ表面の付着物	Fe	主	主	主	主	主	主
	Zn	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Cu	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Ca	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Al	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Si	冊	冊	冊	冊	冊	冊
脱酸銅表面の付着物	Fe	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Zn	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Cu	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Ca	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Al	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Si	冊	冊	冊	冊	冊	冊
(注)冷却塔内沈殿物	Fe	主	冊	冊	冊	冊	冊
	Zn	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Cu	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Ca	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Al	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Si	冊	冊	冊	冊	冊	冊
循環水蒸発残さ	Fe	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Zn	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Cu	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Ca	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Al	冊	冊	冊	冊	冊	冊
	Si	冊	冊	冊	冊	冊	冊

(注) Bは沈殿物ではなく、ルーバーに付着した白色固形物

表 3.9 腐食率と試験期間の関係
Corrosion data by test loop : the effects of exposure time.
温度 45°C, 流速 1 m/s, 合成水中 (単位 mg/dm²/day)

材料	試験期間	脱酸銅	ネーパル黄銅	キュープロニッケル	アルミ黄銅	軟銅	溶融亜鉛めっき鋼
14 日	(1 回)	7.22	19.3	4.97	6.74	198.4	
	(2 回)	4.86	7.99	3.42	9.45	157.6	26.95
	(3 回)	5.97	8.47	4.38	6.37	176.5	
28 日	(1 回)	4.40	19.1	3.46	5.24	144.8	
	(2 回)	3.68	7.29	2.76	7.29	134	28.5
	(3 回)	3.87	9.57	3.35	6.04	124.2	
56 日	(1 回)	3.66	26.0	3.12	4.80	153.2	
	(2 回)	2.91	7.92	2.42	5.62	110.5	25.2
	(3 回)	3.31	9.21	2.96	5.48	84.1	
91 日	(1 回)	3.33	20.7	2.78	4.58	111.7	
	(2 回)	2.74	8.55	2.40	4.90	96.0	17.4
	(3 回)	2.78	11.6	2.89	4.77	138.2	

表 3.10 腐食率と温度の関係
Corrosion data by test loop : the effects of water temperature.
流速 1 m/s, 合成水中 (単位 mg/dm²/day)

試験条件	温度	期間	脱酸銅	ネーパル黄銅	キュープロニッケル	アルミ黄銅	軟銅
30°C	14 日		1.95	5.01	3.79	5.45	99.6
	28 日		1.25	4.23	2.15	3.59	77.3
	56 日		1.51	4.35	1.84	2.73	58.2
	91 日		1.52	4.70	1.58	3.09	52.9
45°C	14 日		7.22	19.3	4.97	6.74	198.4
	28 日		4.40	19.1	3.46	5.24	144.8
	56 日		3.66	26.0	3.12	4.80	153.2
	91 日		3.33	20.7	2.78	4.58	111.7
60°C	14 日		9.61	57.5	3.72	7.81	233.2
	28 日		4.99	51.5	2.32	5.73	160.7
	56 日		3.64	40.6	1.74	4.54	100.8
	91 日		2.92	26.5	1.54	3.51	69.8

表 3.11 腐食率と流速の関係
Corrosion data by test loop : the effects of velocity of flow.
温度 45°C, 合成水中 (単位 mg/dm²/day)

試験条件	流速	期間	脱酸銅	ネーパル黄銅	キュープロニッケル	アルミ黄銅	軟銅
2 m/s	28 日		1.14	3.00	1.49	3.84	105.6
	56 日		2.59	6.16	2.55	6.57	141.6
	91 日		2.38	7.95	2.49	6.03	119.7
1 m/s	28 日		3.87	9.57	3.35	6.04	124.2
	56 日		3.31	9.21	2.96	5.48	84.1
	91 日		2.79	12.0	2.93	4.84	95.2
0.5 m/s	28 日		1.60	5.65	2.04	4.05	97.3
	56 日		2.01	6.46	1.86	3.29	79.6
	91 日		2.03	6.56	1.87	3.23	73.1
0 m/s	14 日		2.14	4.46	2.50	—	76.2
	28 日		2.45	5.89	1.79	—	62.8

3.4 実験室での腐食試験

実際の循環水に似た合成水を作り、この合成水中で流速、温度を一定にして腐食試験した結果を表 3.9~3.11 に示す。

腐食率は、試験期間が長くなるにつれて減少する傾向が認められる。表 3.9 のデータの平均値を用いて腐食率の時間変化を図 3.8 に示す。2 週間の試験では、腐食率がかなり大きな値になる場合があり、亜鉛メッキ、アルミ黄銅、脱酸銅はさらに長期の試験で腐食率が小さい傾向が強い。

腐食率の温度変化について同じ時期に試験した結果を表 3.10 に示している。ネーパル黄銅を除き、試験期間が長くなるにつれて 60°C での腐食率が、45°C での値より小さくなる傾向が認められる。この様子を図 3.9 に示す。M. F. Obrecht 等も硬水で同様の結果を得ている⁽¹⁾。腐食率と流速の関係については、流速 0~2 m/s の範囲で試験した結果を表 3.11 に示す。この結果では、試験期間 28 日で流速の異なる条件での腐食率を比較すると、流速が大きくなるとともに腐食率が増加する傾向が認められる。ただ 2 m/s では、各材料とも 1 m/s の条件より、やや小さい値になっている。この原因は明らかでない。

常温~45°C、流速 0~2 m/s の種々の条件での腐食率を求めるために、上記の実験データおよび一般に知られている経験則をもとにして、次のような仮定をした。

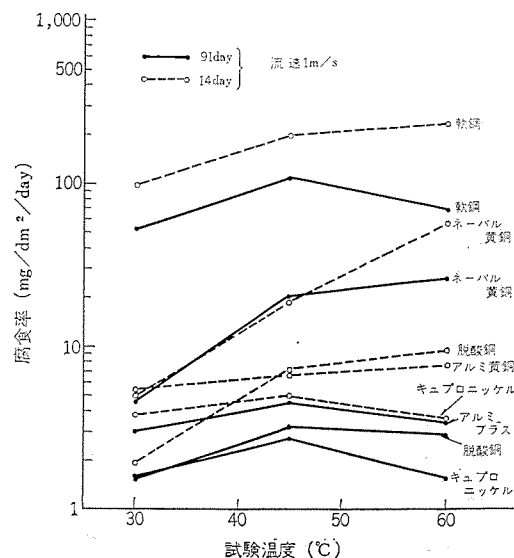


図 3.9 腐食率と温度の関係
Empirical relationship between corrosion rate of metals and water temperature (Velocity of flow 1 m/sec).

(1) 45°C以下の温度では、腐食率の対数が温度に比例する。腐食率の温度依拠性については Robertson 等の研究⁽²⁾⁽³⁾があり、多くの水質ではこの仮定が成立すると考えられる。

(2) 2 m/s 以下の流速では腐食率は、流速に比例して増加する。実験データでは 2 m/s の腐食率が 1 m/s より小さいが、この原因が明らかでないため、この仮定により流速 0～1 m/s の範囲で腐食率が流速に比例するとして 2 m/s の流速まで外そう(挿)すると、実験値より大きな腐食率を推定することになり、安全側に設計できる。

(3) 腐食率には、温度と流速の交互作用が現れない。水道水を循環して冷却するというある限られた水質で、しかも常温～45°C、流速 0～2 m/s という狭い範囲では、この仮定により腐食率の推定値に大きな誤差は生じないものと考えられる。

(4) 腐食率の温度係数および流速係数は、時間により変化しない。温度係数および流速係数は、時間と共に小さくなる傾向があるので、この仮定により安全側に設計できる。また、後述のように、これらの係数を用いて現地試験データを 45°C 1 m/s の条件に補正すると、腐食ループで求めた腐食率とよく一致するので、この仮定は適当と考えられる。

このような仮定のもとで、表 3. 9～3. 11 のデータから次のような実験式を求めた。

$$W(t, \theta, v)/W_t = \{1 + b(v-1)\} \cdot \exp \{a(\theta-45)\} \dots\dots\dots (3.1)$$

ただし、 t : 時間 (day)

θ : 温度 (°C)

v : 流速 (m/s)

$W(t, \theta, v)$: 温度 θ , 流速 v , 時間 t での腐食率 (mg/dm²/day)

W_t : 温度 45°C, 流速 1 m/s の条件で、試験期間 t (day) の実験データ

a : 温度係数 (deg⁻¹)

b : 流速係数 (s/m)

a, b の値は、試験期間 28～91 day の試験データの平均値から求めた。 a は 30°C と 45°C でのデータから求めた。この結果を表 3. 12 に示す。

表 3. 12 腐食率に対する温度係数、流速係数
Coefficient of temperature and flow factor.

材 料	脱 酸 銅	ネーパル 銅	キ ュ プ ロ ニ ュ ケ ル	ア ル ミ 銅	軟 銅
係 数					
温度係数 a (deg ⁻¹)	0.064	0.104	0.032	0.026	0.053
流速係数 b (s/m)	0.33	0.23	0.33	0.42	0.48

4. 考 察

4. 1 現地試験と実験室試験の比較

表 3. 6 は、試験期間 3 カ月の現地試験データであり、この試験での流速は、ほぼ 0 m/s で水温は表 3. 1 に示す。水質は、表 3. 3 に示すように実験室試験とほぼ同じである。この現地試験データを実験室試験データと比較するために、表 3. 12 の温度係数 a , および流速係数 b を用いて補正し、45°C 1 m/s での腐食率を求めた。この際の補正は式 (3.1) の W_t を消去して、次式を使用した。

$$W(91, \theta, v) = W(91, \bar{\theta}, 0) \cdot \frac{1+b(v-1)}{1-b} \exp \{a(\theta-\bar{\theta})\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、 $\bar{\theta}$ は表 3. 1 の現地試験での年間平均水温であり

表 4. 1 現地試験と実験室試験の比較
Comparison of corrosion data with field test and test loop.

材 料		脱 酸 銅	ネーパル 黄 銅	キュプロ ニッケル	ア ル ミ 黄 銅	軟 銅
データの種類						
現地試験データを 温度、流速 について補正して 求めた 45°C, 1 m/s 3 ヶ月の腐食率 (mg/dm ² /day)	A	4.01	10.6	0.695	0.652	104
	B	2.47	3.21	0.228	0.243	51.7
	C	8.11	31.6	3.40	4.15	144
	D	4.36	17.0	0.845	0.986	288
	E	3.50	13.7	0.550	0.517	137
	F	5.48	16.8	0.771	0.563	156
	平 均	4.32	15.5	1.08	1.19	147
実験室で 45°C, 1 m/s で 3 ヶ月間試験し て求めた腐食率 (mg/dm ² /day)	1 回	3.33	20.7	2.78	4.58	111.7
	2 回	2.74	8.55	2.40	4.90	96.0
	3 回	2.73	11.6	2.89	4.77	138.2
	平 均	2.95	13.6	2.69	4.75	115.3

$W=(91, \bar{\theta}, 0)$ は表 3. 6 に示す試験期間 3 カ月の年間平均腐食率である。 $\theta=45$, $v=1$ として式 (4.1) から求めた $W(91, 45, 1)$ の値を表 4. 1 に示す。

キューロニッケルとアルミ黄銅は、現地試験で平均して実験室試験の 1/2～1/3 の腐食率となっているが、図 3. 6, 3. 7 の現地試験での最大値が最小値の 30～40 倍であることから考えて各材料とも比較的よく一致しているといえる。実験式 (3.1) は、表 3. 3 に示す循環水で 15～45°C、流速 2 m/s 以下の種々の条件での腐食率を推定できる。

4. 2 寿命の推定

冷却装置の寿命は、使用材料が腐食による機械的な強度の低下、水漏れの発生により実用に耐えられなくなる時点と考えることにする。これら冷却装置を構成する材料の腐食は、全面が均一に腐食して厚さが減少することは実際になく、一部の最も深い侵食を受けた部分で水漏れが生ずる。この局部腐食の成長速度については、P. M. Aziz⁽⁴⁾等の研究があり、孔食が球状に成長する場合には、孔食深さが時間の 1/3 乗に比例することが示されており、アルミニウム、ステンレス鋼で一致する結果が得られている⁽⁵⁾。

表 3. 7 に示した試験片の最大侵食深さは、観測された最大値を示すものであり水温、水質、試験期間との相互関係を見つけるには十分でないが、3 カ月および 1 年の間、6 カ所の変電所で試験して得られた結果を用いて侵食深さの成長速度が時間の 1/3 乗に比例するとして冷却器の概略寿命を推定すると次のようになる。いま 1 年間試験して得られた最大侵食深さを l_{\max} (mm) とし、 τ 年後の最大侵食深さを $D_l(\tau)$ (mm) とすると、

$$D_l(\tau) = \tau^{\frac{1}{3}} l_{\max} \dots\dots\dots (4.2)$$

また腐食減量から求めた腐食率の単位を次式により mm/y に変換する。

$$d(\theta, v) = \frac{3.65 \times 10^{-2}}{\rho} \cdot W(365, \theta, v) \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、 $d(\theta, v)$: 温度 θ °C、流速 v m/s における腐食率 (mm/y)

ρ : 金属の密度 (g/cm³)

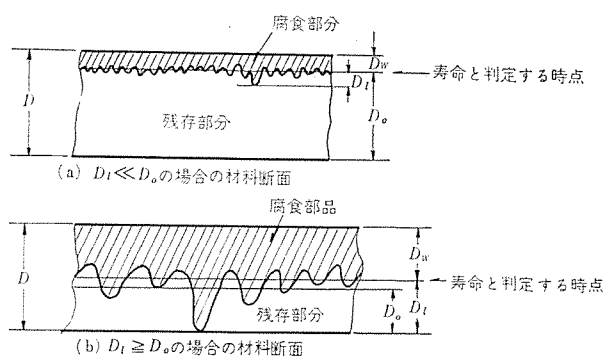
$W(365, \theta, v)$: 試験期間 1 年の腐食減量から推定した腐食率で、温度 θ °C、流速 v m/s での値 (mg/dm²/day)

$W(365, \theta, v)$ は式 (4.1) と同様にして表 3. 5 の実験値 $W(365, \theta, 0)$ から次の関係を用いて推定する。

表 4.2 30 年間の使用に耐える冷却器材料の厚さ⁶⁾
Minimum thickness of metals for water cooling services of 30 years.

材 料	脱 酸 銅	ネーバル銅	キューブロニッケル	アルミ銅	ステンレス鋼	軟 銅	鋳 鉄	亜鉛メッキ銅	アルミニウム
最大侵食深さ ¹⁾ l_{\max} (mm)	0.23	0.095	0.21	0.14	0.12	1.0	0.4	—	0.95
30 年後の侵食深さ ²⁾ D_I (mm)	0.72	0.30	0.65	0.44	0.37	3.1	1.2	—	3.0
腐食率 ³⁾ $d(\theta, v)$ $\theta=20^\circ\text{C}$ $v=0\text{ m/s}$	最大 (mm/y)	0.0042	0.0053	0.0045	0.0038	0.00014	0.092	0.0112	0.056
	平均 (mm/y)	0.0019	0.0025	0.0018	0.0010	0.00010	0.054	0.0060	0.032
30 年後の厚さ減少 D_W 最大値 (mm)	20°C 0 m/s	0.126	0.159	0.135	0.114	0.0042	2.76	0.336	1.68
	20°C 1 m/s	0.189	0.207	0.204	0.195	—	5.28	—	—
	45°C 0 m/s	0.63	2.28	0.30	0.213	—	10.3	—	—
	45°C 1 m/s	0.93	2.97	0.45	0.372	—	19.8	—	—
寿命 30 年に必要な厚さ ⁴⁾ D_0 (mm)	20°C 0 m/s	0.85	0.46	0.79	0.56	0.38	5.9	0.34	4.7
	20°C 1 m/s	0.91	0.51	0.86	0.64	—	8.4	—	—
	45°C 0 m/s	1.35	2.58	0.95	0.66	—	13.4	—	—
	45°C 1 m/s	1.65	3.27	1.10	0.82	—	22.9	—	—

- (注) 1) 6 ヶ所の変電所に 1 年間放置した試験片 (各 2 枚) で測定した侵食深さの最大値。
2) 局所的な侵食の成長速度が時間の 1/3 乗に比例すると、 l_{\max} から算出した値。
3) 6 ヶ所の変電所に 1 年間放置した試験片の重量変化から求めた腐食率。
4) D_I と D_W の和 (D_I は流速、温度により変化しないとして計算した)。
5) 機械的強度を保持するために必要な厚さ D_0 が D_I より小さい場合の値である。



D : 材料の元の厚さ
 D_W : 全面が平均して侵食される厚さ
 D_I : 局所的な最大侵食深さ
 D_0 : 要求される機械的強度を保持するために必要な厚さ

図 4.1 材料の腐食による寿命の推定方法
Corrosion life estimation of metals.

$$W(365, \theta, v) = W(365, \bar{\theta}, 0) \cdot \frac{1+b(v-1)}{1-b} \cdot \exp\{a(\theta-\bar{\theta})\} \quad (4.3)$$

全面が平均して侵食される厚さ $D_W(\tau)$ は

$$D_W(\tau) = \tau \cdot d(\theta, v) \quad (4.4)$$

である。冷却器の部品の厚さを D_I (mm) とし、要求される機械的強度を保持するために必要な厚さを D_0 (mm) とし、図 4.1 (a) のように局所的な侵食による強度変化が無視できる場合 ($D_0 \gg D_I$) には次のように寿命を推定する。

$$D_I = D_W(\tau) + D_0 \quad (4.5)$$

$$\tau = \frac{D_I - D_0}{d(\theta, v)} \quad (4.6)$$

また、図 4.1 (b) のように冷却管などで局所的な侵食が問題となる場合 [$D_0 \lesssim D_I(\tau)$] には、次式により寿命を推定する必要がある。

$$D_I = D_W(\tau) + D_I(\tau) \\ = \tau d(\theta, v) + \tau^{\frac{1}{3}} \cdot l_{\max} \quad (4.7)$$

式 (4.2), (4.3) を使用して、表 3.5 の腐食率の最大値および 6 ヶ所の平均値から求めた $d(\theta, v)$ の値と、30 年の使用に耐える冷却器用材料の厚さを式 (4.7) から推定して表 4.2 に示す。寿命の推定には式 (4.7) へ、与えられた D_I の値に近くなるように適当な

表 4.3 冷却水の標準および水質基準値
Standard composition of cooling water.

項 目	標 準 値 ¹⁾		水質基準値 循環水
	補給水	循環水	
pH (25°C)	—	—	6.0~8.0
電 導 度 (25°C) ($\mu\text{ mho/cm}$)	160~250	320~500	500 以下
塩 素 イ オン Cl^- (ppm)	13~22	26~44	100 以下
全 硬 度 CaCO_3 (ppm)	50~75	100~150	150 以下
硫酸イオン SO_4^{2-} (ppm)	24~40	48~80	200 以下
M-アルカリ度 CaCO_3 (ppm)	29~40	58~80	15~60
イ オ ウ イ オン S^{2-} (ppm)	—	—	注 ¹⁾
アンモニウムイオン NH_4^+ (ppm)	—	—	注 ¹⁾
全 鉄 Fe (ppm)	0.3 以下	—	0.5 以下
シ リ カ SiO_2 (ppm)	12~16	24~32	30 以下

- (注) 1) イオウイオン、アンモニウムイオンは基準値としては示していないが微量でも、銅および銅合金の腐食を著しく促進することがあるので検出されないことを目標とすべきである。
2) 補給水の 60% が入る限界値であり、空欄とした項目は分析データ数が少ない。なお pH は採水後 10 日間程度経過して測定しており、経時変化が認められる場合があったので空欄とした。

τ の値を代入することにより寿命が推定できる。なお、ステンレス鋼・ネーバル黄銅・アルミ黄銅では、応力腐食が生ずることがあり、また異種金属が接触する部分では腐食が促進されるので、このような腐食については、冷却器の構造、接合方法などに十分注意する必要がある。

当社の変圧器用冷却装置の各部について検討したところ、現在の水質、その他の使用条件下で 30 年以上の寿命が期待できると推定された。ただし酸性ガスを吸収してアルカリ度が低下した水では、短期間に著しく腐食するので注意を要する。

4.3 水質基準

冷却器において水のために生ずるトラブルは、材料の腐食とスケールの形成がおもなものである。腐食の原因となる項目としては、pH、電導度、塩素イオン、硫酸イオン、全鉄、アンモニウムイオン、イオウイオンなどがおもなものである。また、スケール形成と関連のある項目は、カルシウムイオン (全硬度)、アルカリ分 (M-アルカリ度)、シリカなどである。ただ、これらの項目は相互に関連性があり、たとえば塩素イオンなどの腐食性の成分が多くても pH が高く、カルシウムイオンが多い場合には金属の腐食性は小さくなる。金属の腐食、スケール形成などの点で実用上、支障ない水質基準値および標準値を表 4.3 に

表 4.4 濃縮倍数と補給水量・ブロー量の関係
Estimated correlation among the concentration of dissolved solid substance, amount of water supply and amount of water blow.

(100 MVA の変圧器 100 % 負荷, 損失 700 kW と仮定をして計算)

濃 縮 倍 数 (N)	2	3	4	5	∞
補 給 水 量 (M) l/h	2,100	1,580	1,400	1,300	1,050
ブ ロ ー 量 (B) l/h	1,050	530	350	250	—

(注) 次の関係式により計算した。

$$M = \frac{N}{N-1} \cdot E \quad \left(\begin{array}{l} \text{ただし, } N: \text{濃縮倍数} \\ M: \text{補給水量 (l/h)} \\ E: \text{蒸発損失 (l/h)} \\ W: \text{飛散損失 (l/h)} \\ B: \text{ブロー量 (l/h)} \end{array} \right)$$

$$B = \frac{1}{N-1} \cdot E - W$$

$$W = 0 \text{ l/h とし}$$

$$E = \frac{700 \times 860.42 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right)}{575 (\text{kcal/kg})} \div 1,050 \text{ l/h とし, } N \text{ の値 } 2, 3, \dots \text{ の場合の } M, B \text{ を計算する。}$$

表 4.5 補給水量, ブロー量および濃縮倍数の実測値
Measured amount of water supply and of water blow and concentration ratio of circulating water to supply water with analysis data of Cl ion.

(45 年 3 月より 1 年間の記録(平均値)であり表 4.4 と比較するため 100 MVA あたりに換算した)

変 電 所	A	B	C	D	E	F
濃 縮 倍 数 N	1.8	12	6.6	2.8	7.6	2.7
補 給 水 量 l/h	100	240	200	420	150	240
ブ ロ ー 量 l/h	—	3.1	4.1	92	20	—

示す。ここで、基準値と補給水の標準値は、6カ所の変電所から試験期間中に採水した水のうち 60 % の水が入るような値とし、循環水の標準値については、今回の試験に先立ち別途、変電所で 1 年間にわたりスケールの生成に関する調査を行なって、全硬度 156~165 ppm (CaCO₃) では、冷却装置にスケールの生成が認められないことが確認されており⁽⁶⁾、この全硬度の値が、補給水の標準値の 2 倍に近い値であるので、補給水の標準値の 2 倍と定めた。なお、循環水の水質基準値は補給水の標準値の 2 倍に近い値をとっている。循環水の水質基準値の各数値のうち、電導度を 500 μmho/cm 以下としたので、金属の腐食性は小さい水質であると考えられる。pH は一般に腐食性、スケールの形成が少ないといわれている範囲とした。ただ、M-アルカリ度に下限を設け、亜硫酸ガスを著しく吸収する場合に銅および銅合金の腐食が顕著になる限界とした。M-アルカリ度の上限は補給水の標準値の 2 倍より小さいが、この理由は、塩素イオン濃度 100 ppm 以下の水で、M-アルカリ度が 60 ppm (CaCO₃ として) 以上になることは少ないことと、M-アルカリ度が 60 ppm を越える場合には、各種金属の腐食率が大きくなる傾向がみられるからである。(表 3.3, 図 3.4, 3.6, 3.7 および表 4.1 参照, D でこの傾向がある) このため M-アルカリ度の基準値の上限は、補給水の M-アルカリ度の平均値の約 2 倍とした。以上の説明から明らかなように、表 4.3 に示す水質基準値は、東京都内の市水を使用して濃縮倍数 2 以下となるようにオーパフーなどのブローを行なうことにより、管理できる水質である。また、標準値は水が正常なものであ

るかどうか判断するための参考値である。

実際にこのような水質に保つために必要な補給水量を推定するため、100 MVA の変圧器について、100 % 負荷の際の変圧器の損失を 700 kW 程度と仮定して計算すると表 4.4 のようになる。濃縮倍数 2 とするための補給水量は、飛散損失がないと仮定し蒸発量とブロー量が等しいとして 2,100 l/h となるが、今回の研究の際に各変電所で実測した補給水量は、変圧器の負荷が 100 % より小さいため表 4.4 に示す計算値よりかなり少なく、濃縮倍数 2 とするための補給水量は 100 MVA 当りに換算すると、100~500 l/h 程度となっている。この換算値を表 4.5 に示す。

5. む す び

以上、冷却器用材料の腐食については、現地試験結果と実験室における実験結果より導き出した腐食と水質、流速、温度の関係式が比較的よく一致する結果を得た。これによって三菱電機の標準の水冷式熱交換器の寿命を推定すると、実用的な水質管理のもとで 30 年以上の寿命が期待できることが明らかとなった。またその他の金属材料についても、腐食寿命の推定に有効な資料を多く得ることができた。

水質管理と保守の基準についても、現地における 1 年間にわたる、周期的な補給水および循環水の採取、分析結果と、この試験に先立って行なわれた、スケール形成についての試験の結果により、冷却装置の腐食、スケール形成などによる問題の生じない水質の限界値を示すことができた。

これらによって、変圧器用冷却装置の腐食面からみた信頼性の向上と経済性の追求に役立てることができ、さらに管理、保守の面にも一つの指針となると確信する。

近年、大都市の大気汚染の度合はますます増加の一途をたどり、このような冷却水循環方式の水の汚損は年々増加されるものと思われるので、水質の検査は欠かすことができないであろう。このような折にもまた本報告が役立つことを期待する。

最後に本データの集積にあたっては、東京電力(株)上記 6 変電所の各位に多大なご援助をいただいたことを報告すると共に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) M. F. Obrecht, L. L. Quill : Heating, Piping and Air Conditioning, 105~113 (May, 1960)
- (2) W. D. Robertson, V. F. Nole, W. H. Davenport and F. P. Talboom : J. Electrochem. Soc. 105, 569 (1958)
- (3) F. J. Asselin and F. A. Rohrman : Ind. Eng. Chem., 32, 1,015 (1940)
- (4) P. M. Aziz : Corrosion, 12, 495 (1956)
- (5) Z. S. Smialowska : Corrosion-NACE, 27, 223 (1971)
- (6) 枝, 古屋 : 明電舎時報, No. 4. 通巻 93 号, 12~19 (昭 45)
- (7) 豊田 : 工業用水とその水質管理, 昭晃堂 (昭 36)

絶縁油の低温における交流破壊電圧に及ぼす水分の影響

上 田 実*・石井 敏次**

Effect of Moisture on AC Breakdown Voltage of Insulating Oil at Low Temperature

Nagoya University, Faculty of Engineering Minoru UEDA
Mitsubishi Electric Corp., Itami Works Toshitsugu ISHII

As to the transformer operated in cold districts, breakdown voltage of insulating oil at low temperature is very important. Studies have been made on the relation between the AC breakdown voltage and the moisture contained in the oil at low temperature with mineral oil JIS No. 2, alkylbenzene and silicone oil. It has been found that the AC breakdown voltage shows the minimum value at a temperature where the moisture in the oil becomes in a saturated condition and the oil begins to cloud. When the moisture is reduced to a certain value, the minimum breakdown voltage is observed at a temperature where the viscosity of oil becomes 100~200 cp with no regard to the quantity of moisture. And further, it is made clear that, in the range where the breakdown voltage increases with the increase of the temperature, the relation of the breakdown voltage with the moisture content and also with the temperature can be represented by the degree of moisture saturation.

1. ま え が き

油入変圧器の絶縁材料として最も多量に使用されているのは、絶縁紙と絶縁油である。絶縁紙は、絶縁油とくらべて多量の水分を吸湿するが、吸湿した油浸紙の破壊電圧は、温度の低下とともに上昇することはあっても低下することはない⁽¹⁾。しかし、絶縁油の破壊電圧は、温度の低下とともにV字形の特性を示し、ある温度範囲では室温における破壊電圧よりも著しく低くなる⁽²⁾。とくに、油中に多量の水分が存在する場合には、低温における破壊電圧は著しく低くなる⁽³⁾。したがって、油入変圧器が寒冷地で使用される場合には、油中水分が絶縁油の低温における破壊電圧に対してどのような影響を及ぼすかということが、変圧器を製作するうえにおいて重要な問題になるが、この点の詳細については従来ほとんど研究されていないため不明点が多い。

筆者らは、寒冷用絶縁油の具備すべき物性を明らかにするとともに、絶縁油の破壊電圧からみた水分許容量を明らかにするため、2号鉱油およびアルキルベンゼンの低温における交流破壊電圧と油中水分との関係を調べ⁽⁴⁾、また、シリコン油の交流破壊電圧についても二、三のデータを得たので、その結果について報告する。

2. 試 料 油

試料油としては、変圧器用絶縁油として一般に使用されている2号鉱油(JIS C 2320)、アルキルベンゼンおよびシリコン油を用いた。これらの油の入荷時における特性は、表2.1に示すようであった。いずれの項目も、JIS C 2320に定められている方法で測定した値である。図2.1および図2.2は、これらの油の比重あるいは粘度と

表 2.1 試料油の一般特性
General properties of sample oils.

測定項目	$\tan \delta$ (%) 80°C	ρ (g/cm ³) 80°C	ϵ 80°C	全酸価 (mgKOH/g)	引火点 (°C)
2号鉱油	0.12	3×10^{13}	2.25	0.004	137
アルキル ベンゼン	0.002	$1 \times 10^{15} <$	2.19	0.001	143
シリコン油	0.001	1.7×10^{15}	2.54	—	291

温度との関係を示す。比重は浮はかり(秤)式比重計を用いて測定し、粘度はJIS K 2283の方法で測定した。

破壊電圧の測定に際しては、入荷時の油をそのまま使用し、脱水

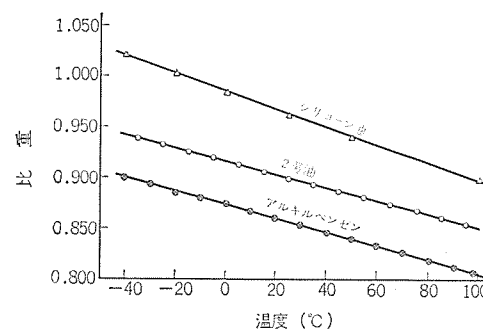


図 2.1 比重と温度の関係
Relation between temperature and specific gravity

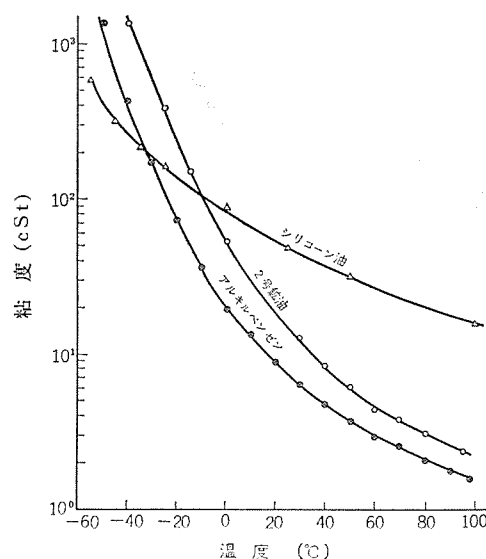


図 2.2 粘度と温度の関係
Relation between temperature and kinematic viscosity.

あるいは吸湿以外の前処理は行なわなかった。脱水には真空脱気処理で行ない、吸湿させる場合には試料油を大気にさらしたり、あるいは恒温恒湿そう中に一定時間放置して行なった。

3. 試験方法

測定電極には内容積約500 mlのガラス製密閉構造のものを用いた。電極球は、ステンレス鋼製で直径は12.5 mm、電極ギャップは2.5 mmまたは1.5 mmである。

試料油の注入に先だって、電極球および電極容器をアセトンとイオン交換水でじゅうぶんに洗浄したあとで乾燥し、これを室温まで冷却する。つぎに試料油を約300 ml注入し、電極容器内を1~2 mmHgの真空に約1分間保って電極球に付着している気ほうを除いたあと、これをプッシング付きの低温そうまたは恒温油そうへ入れる。試料油の温度が所要温度に達してからその温度に30~120分間保ったあと、電極容器内を大気圧にもどして破壊電圧を測定した。

破壊電圧測定装置は、交流60 Hzで100 kVまで測定できるものを用いた。電圧上昇速度は3 kV/sにした。破壊試験は、1カップについて連続5回ずつ行なったが、ここでは第1回目の破壊値についてのみ述べる。破壊電圧測定後の油については、油中水分量をカルフィッシャー法で測定した。

4. 試験結果

図4.1~図4.3は、それぞれ2号鉱油、アルキルベンゼンおよびシリコン油の交流破壊電圧と温度との関係を、油中水分量をパラメータとして示したものである。図中の各点は、5カップの平均値を示し、平均値からのばらつきはいずれも±10 kV程度であった。

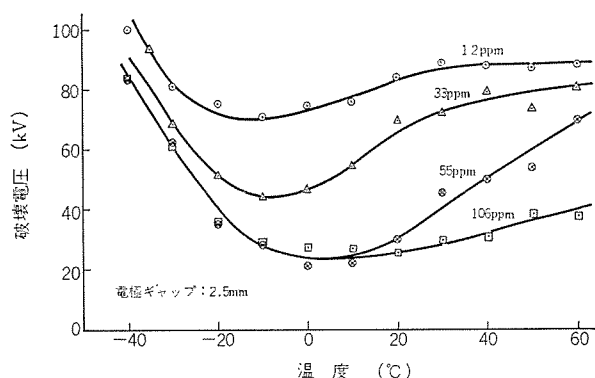


図 4.1 2号鉱油の交流破壊電圧と温度
Effect of moisture on the temperature~AC breakdown voltage characteristics of JIS No. 2 oil.

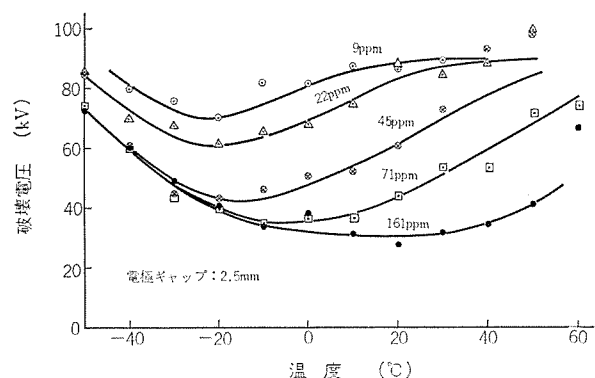


図 4.2 アルキルベンゼンの交流破壊電圧と温度
Effect of moisture on the temperature~AC breakdown voltage characteristics of alkylbenzene.

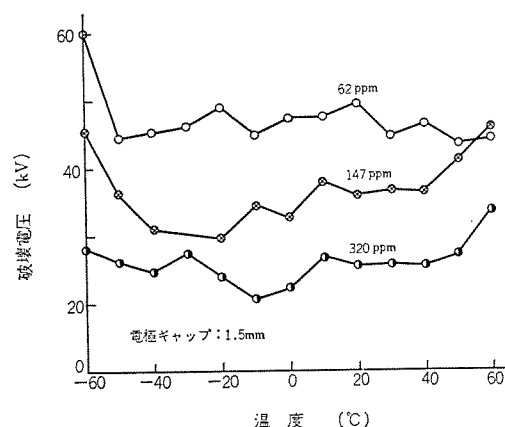


図 4.3 シリコン油の交流破壊電圧と温度
Effect of moisture on the temperature~AC breakdown voltage characteristics of silicone oil.

2号鉱油およびアルキルベンゼンの場合には、破壊電圧と温度との間にはV字形の関係がみられ、破壊電圧が極小値を示す温度は、油中水分が多くなるほど高温側へずれ、また破壊電圧の極小値は油中水分が多くなるほど小さくなる。シリコン油に関しては電極ギャップが小さいためか、2号鉱油あるいはアルキルベンゼンほどきれいな曲線は得られなかったが、油中水分量・温度によって破壊電圧が影響されることは明らかである。

5. 考察

5.1 破壊電圧と油中水分

図5.1および図5.2は、それぞれ2号鉱油あるいはアルキルベンゼンの破壊電圧が油中水分によってどのように変化するかをみるため、

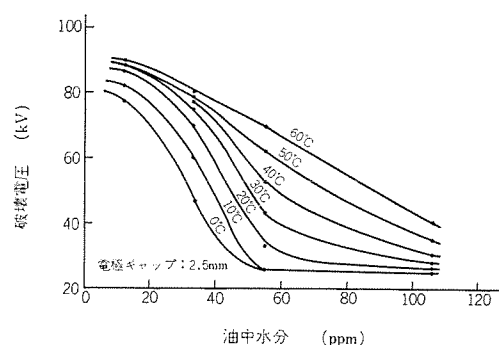


図 5.1 2号鉱油の交流破壊電圧と水分
Effect of moisture on AC breakdown voltage of JIS No. 2 oil.

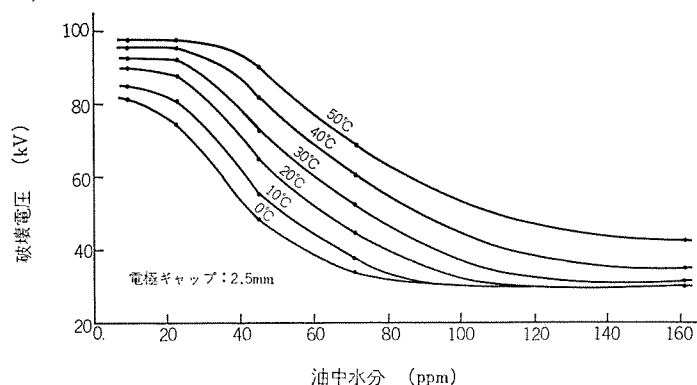


図 5.2 アルキルベンゼンの交流破壊電圧と水分
Effect of moisture on AC breakdown voltage of alkylbenzene.

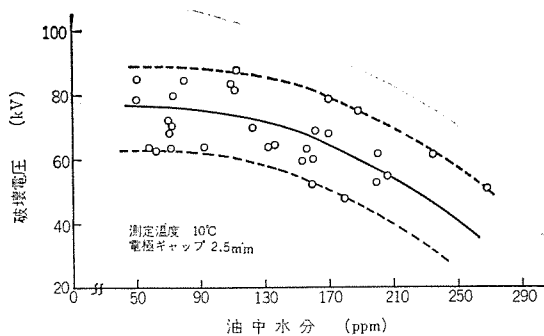


図 5.3 シリコン油の交流破壊電圧と水分
Effect of moisture on AC breakdown voltage of silicone oil.

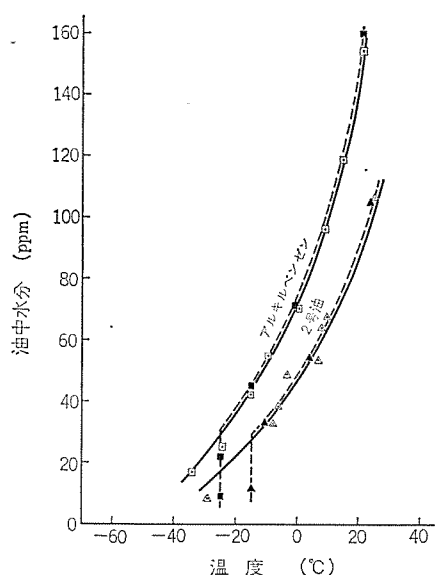


図 5.4 油中水分量と白濁温度(実線)あるいは破壊電圧極小値温度(点線)との関係
Relation between moisture content and cloud point (solid line) or temperature at which breakdown voltage shows minimum value (dotted line).

図 4.1 あるいは図 4.2 の結果の一部を、破壊電圧と油中水分量との関係にプロットしなおしたものである。

2号鉱油、アルキルベンゼンのいずれの油も温度が比較的高い場合には、微量水分による破壊電圧の低下は比較的少ないが、ある一定の水分量以上になると、水分の増加とともに急激に低下する。そして、さらに水分が増加してある一定の水分量以上になると、ふたたび破壊電圧は水分が増加しても変化しなくなる。水分の増加とともに破壊電圧が急激に低下しはじめる限界の水分量、および水分がそれ以上増加しても破壊電圧がほとんど変化しなくなる限界の水分量は、温度が低くなるにつれて次第に少なくなる。

ところで、鉱油の交流破壊電圧と油中水分との関係については、Clark⁽⁶⁾、Zein El-Dine、Troppe⁽⁶⁾、Rohlfis、Turner⁽⁷⁾ および Wolff⁽⁸⁾ の報告があるが、測定結果は各研究者によって必ずしも一致しているとはいえない。この点に関しては、各研究者によって試料油、測定電極の形状および測定方法などが異なっているため、データに違いを生じたものとも思われるが、図 5.1 の結果をみると、破壊電圧の水分依存性は測定温度によっても著しく異なり、測定温度の違いも相当重要な要因になっているものと推定される。

図 5.3 は、シリコン油の 10°C における破壊電圧と油中水分との関係を示す。図 4.3 の場合には 1.5 mm ギャップの電極を用いて測

定を行なったが、図 5.2 の場合は 2.5 mm ギャップの電極を用いて測定した。破壊電圧は、油中水分が約 100 ppm 以上になると、水分の増加とともに急激に低下する。

5.2 破壊電圧が最小値を示す温度

絶縁油の水分飽和溶解度は、温度が低下するにつれてしだいに小さくなる。したがって、室温付近では透明であっても、ある温度以下では水分が析出し、油は白濁する。図 5.4 は、あらかじめ一定量吸湿させた 2号鉱油あるいはアルキルベンゼンをすり合わせ、せん付きの試験管へ入れ、これをドライアイスヘキサン浴に浸し、油が白濁しはじめる温度と油中水分量との関係を調べた結果を示す。また、図には図 4.1 および図 4.2 から求めた破壊電圧が極小値を示す温度と油中水分量との関係も点線でプロットされている。2号鉱油、アルキルベンゼンのいずれの場合も、油中水分が約 30 ppm 以上では破壊電圧が極小値を示す温度と油の白濁温度とはよく一致している。

油中水分が約 30 ppm 以下の場合には、破壊電圧は油中水分量には関係なく、2号鉱油では -15°C、アルキルベンゼンでは -25°C で極小値を示す。このように、破壊電圧が油中水分量には関係なく極小値を示す温度は、2号鉱油とアルキルベンゼンとで相当異なっているが、これらの温度における 2号鉱油およびアルキルベンゼンの粘度は、それぞれ 139 cp および 102 cp となり、よく一致している。

なお、シリコン油に関しては、破壊電圧測定値のばらつきが大きかったために詳細な検討は行なわなかったが、図 4.3 において、油中水分 62 ppm の場合の白濁温度は -60°C 以下であり、147 ppm および 320 ppm の場合にはそれぞれ -20°C および 20°C であった。

5.3 破壊電圧と水分飽和度

図 4.1 および図 4.2 において、破壊電圧が温度の低下とともに低下する領域を高温領域、温度の低下とともに上昇する領域を低温領域と呼ぶことにする。

油中水分が、破壊電圧に対してどのような影響を与えるかということ、その水分がどのような状態で存在するかということによって異なるものと考えられる。絶縁油中の水分を大きく分ければ、

- (1) 完全に溶解している水分
- (2) 液体粒子状水分
- (3) 固体粒子状水分

の3種類になるものと思われる。水分飽和溶解度以下の水分は、溶解水分として存在する。水分飽和溶解度よりも多い水分が絶縁油中に存在する場合には、水分飽和溶解度までの水分は溶解水分として存在し、飽和溶解度をこえる水分は温度が 0°C より高ければ、液体粒子状水分、0°C 以下の場合には固体粒子状水分として存在する。したがって、一定量の水分を含んだ絶縁油において、そのうちのどれだけが溶解水分として存在し、また、どれだけが液体粒子状水分あるいは固体粒子状水分として存在するかは、水分飽和溶解度によって異なる。

筆者らの試験では水分飽和溶解度を直接測定してはいないが、図 5.4 に示した油中水分量と白濁温度との関係を示す曲線は、近似的には水分飽和溶解度と温度との関係を示す曲線と考えることができ、絶縁油の水分飽和溶解度は温度の低下とともに小さくなることわかる。ここでは、この点に着目して図 4.1 および図 4.2 に示した 2号鉱油およびアルキルベンゼンの高温領域における破壊電圧と水分ならびに温度との関係について考えてみよう。

図 4.1、4.2 の結果をみると、高温領域における破壊電圧は、主として水分飽和溶解度に対して実際にはどれだけの水分が溶解し

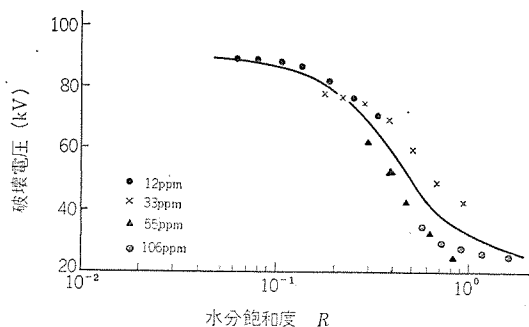


図 5.5 2号鉱油の水分飽和度と破壊電圧の関係
Relation between degree of moisture saturation R and AC breakdown voltage on JIS No. 2 oil.

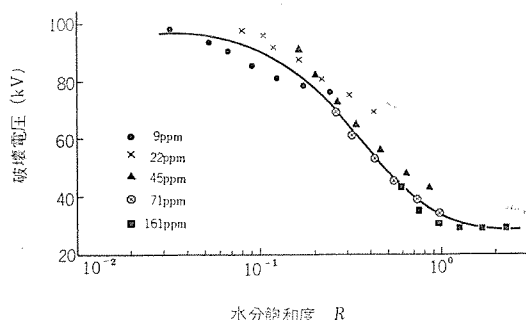


図 5.6 アルキルベンゼンの水分飽和度と破壊電圧の関係
Relation between degree of moisture saturation R and AC breakdown voltage on alkylbenzene.

ているかということによって支配されているように思われるので、

水分飽和度 $R = (\text{溶解水分量}) / (\text{水分飽和溶解度})$

なる量を考えることにする⁽⁹⁾。

図 5.5 および図 5.6 は、図 4.1 および図 4.2 の高温領域における破壊電圧を、水分飽和度 R に対してプロットしなおしたものである。2号鉱油、アルキルベンゼンのいずれの油も、図 4.1 あるいは図 4.2 においては水分量の違いによって数本の曲線が描かれているが、図 5.5 および図 5.6 においては、1本の曲線になっている。このことから、高温領域における破壊電圧に対しては、水分あるいは温度がべつべつに影響を及ぼしているのではなく、水分飽和度なる一つの量によって支配されているものと思われる。

ところで、図 5.5 および図 5.6 の結果を絶縁油の水分許容限界という観点からみるならば、2号鉱油、アルキルベンゼンのいずれの破壊電圧も、 $R=0.1 \sim 0.2$ 以下ではほとんど一定値を示し、これらの

油の水分許容限界は、使用最低温度において $R=0.1 \sim 0.2$ になる水分量であると考えることができよう。

6. む す び

2号鉱油、アルキルベンゼンおよびシリコン油の低温における交流破壊電圧と油中水分との関係を測定した。シリコン油に関してははっきりした傾向をつかむことはできなかったが、2号鉱油およびアルキルベンゼンに関しては、つぎの事柄が明らかになった。

(1) 破壊電圧は、温度が低下するにつれてしだいに低下し、ある温度で極小値を示すが、油中水分が約30 ppm 以上の場合には、破壊電圧が極小値を示す温度と白濁温度とは一致する。

(2) 油中水分が約30 ppm 以下の場合には、油中水分量には関係なく、2号鉱油では -15°C 、アルキルベンゼンでは -25°C で極小値を示すが、これらの温度における2号鉱油およびアルキルベンゼンの粘度は、それぞれ139 cp および102 cp であり、よく一致している。

(3) 破壊電圧が温度の上昇とともに増大する領域の破壊電圧に対しては、水分と温度とがべつべつに影響を及ぼしているのではなく、水分飽和度なる一つの量によって支配されているものと考えられる。

(4) 水分が混入しても破壊電圧がほとんど変化しない最大の水分量を水分許容限界と考えれば、使用最低温度における水分飽和度が $0.1 \sim 0.2$ になる水分量を水分許容限界と考えることができる。

(昭和47-5-26 受付)

参 考 文 献

- (1) 石井, 白井: 電学誌, 87-11, 950, 2,184 (昭42)
- (2) 山内, 蓬郷: 電学誌, 81, 879, 1,995 (昭36)
- (3) F. M. Clark: AIEE Trans. (Electrical Engineering) 59, 433 (1940)
- (4) 石井, 上田: 電気学会論文誌, 92-A, 3, 154 (昭47)
- (5) F. M. Clark: AIEE Trans., 59, 433 (1940)
- (6) M. E. Zein El-Dine, H. Tropper: Proc. IEE, 103, pt. C, 35 (1956)
- (7) A. F. Rohlf, F. J. Turner: AIEE Trans., pt. III, 76, 1,439 (1957)
- (8) K. Wolff; Brown Boveri Review, 52, 11/12, 897 (1965)
- (9) 石井, 難波, 牧野: 電学誌, 91, 6, 1,119 (昭45)

電子計算機によるプリント配線板の完全自動化検査システム

小島 一男*・田中千代治*・上野 靖彦*
柳 沢 寛*・金 田 一*・松沼 武夫*

Full Automatic Test System of Printed Circuit Boards with Digital Computer

Kamakura Works Kazuo KOJIMA・Chiyoji TANAKA・Yasuhiko UENO
Hiroshi YANAGISAWA・Hajime KANADA・Takeo MATSUNUMA

An automatic test system has been developed to test the functions of printed circuit boards and to point out faulty sections in case of rejects. Two kinds of test stations are controlled by one electronic computer MELCOM-1530. One is for functional tests to examine the logical function. The other is for parametric tests to observe pulse wave forms. The test results are printed with a tape printer or a line printer so as to make known the parts to be changed. It is essential to provide beforehand a test pattern and a test program set in with this pattern for each lot of printed circuit boards. In the functional test, soft ware is prepared to execute the test automatically by using a MELCOM-7000.

1. ま え が き

電子計算機をはじめ一般のデジタル電子装置では、部品を装着したプリント配線板(以下プリントカードという)を基本的な実装単位としている。数年前までのプリントカードは基本的な論理機能などを実装し、裏面配線で相互に接続して所期の電子回路をつくるはん(汎)用カード方式であった。はん用カードは機能が単純なものが多く、種類も少ないので、機種ごとに専用のカードテストが製作されることが多かった。この場合、入出力端子の数も少ないので、良品と被検査品の2枚のプリントカードを並行してすべての入力テストパターンを加え、両者の出力の一致、不一致により可否を判定する比較式テストが実用されている。

しかしながら、集積回路技術の進歩と製品の高性能化に伴って、1枚のプリントカードに多数の回路素子を収容する機能化大形カードが一般的になるにつれ、従来の検査方法は不十分になってきた。大形機能カードはプリントカード自身が複雑な機能を有し、入出力端子数は多く、また種類も多くなる。したがって専用カードテストの製作は困難となり経済的でない。また、不合格品と判定し得た場合、不良部品の指摘には専門の検査員が長い時間をかけて調べなければならないが、場合によっては不可能に近いことになる。

大形機能カードの検査のスピードアップと省力化の具体策は、計算機制御によるテストのはん用化以外には存在しない。開発品の多い多機種少量生産の工場では、機能カードがますます多く誕生し、技術水準の高い検査員や、テスト設計技術者を十分確保することはもはや困難になっている。したがって、検査作業においては、プリントカードをテストにそう入すれば計算機がこれを即座に検査し、不良部品があればその位置を印刷し、検査員はテストの操作のみを行ない、修理員はテストの指摘した部品を交換する形にしなければ、工場の生産が円滑に流れない。設計部門においても新しいプリントカードを設計するとき、検査方法は自動的に定まるようにしなければならない。プリントカードごとに検査装置や検査方法を考えている間は、検査が自動化されたとはいえない。

今回開発した自動検査システムはこのような目標に対して開発した

もので、計算機制御のもとで検査を行なうためのテストのハードウェアおよびソフトウェア、ならびに検査パターンを自動的に求めて検査プログラムを自動作成するプログラムで構成されたシステムである。

2. 故障検査方式

2.1 ファンクションテスト

論理回路のファンクションテストについては種々の研究により、故障診断特有のことばが使用されている。このため、故障診断に使用される基本的なことばを以下に説明する。

(1) 故障(fault または failure): 論理回路の故障の種類は、固定故障/一時故障、縮退故障(スタック故障(脚注1)) /機能故障、素子故障/ブリッジ故障、一重故障/多重故障などに分類されるが、一般に故障の自動診断においては固定故障・縮退故障・素子故障・一重故障のみを取扱う。具体例として、図2.1(a)の2入力ANDの場合には、図2.1(c)の表のとおり、二つの入力に対しそれぞれ“0”、“1”縮退、および出力Cに対し“0”、“1”縮退の計6個の故障が存在する。本システムも同様にこれらの故障のみを取扱うが、検査の方法により一時故障・多重故障に応用することも可能である。

入 力		a	0	0	1	1
	故障	b	0	1	0	1
出 力	a s-a-1	0	1	0	1	
	a s-a-0	0	0	0	0	
	b s-a-1	0	0	1	0	
	b s-a-0	0	0	0	0	
	c s-a-1	1	1	1	1	
	c s-a-0	0	0	0	0	
力	故障なし	0	0	0	1	

(c)

図 2.1 故障と同値故障の例
Example of failures and the equivalent failures.

(脚注1): 縮退故障(Stuck failure)とは、各入出力端子が論理値“1”または“0”に固定する故障を意味し、“1”故障に対しては、S-a-1(Stuck at 1)、“0”故障に対しては S-a-0 と書く。

(2) 検査 (テスト, Test): 検査とは、1個または複数個の故障を検出するために必要な一組の入出力信号系列 (テストパターン) を意味する。組合せ回路の場合には、ある故障を検出するのに一つのパターンで十分であるが、順序回路の場合には、複数個のパターンで一つのテストが構成されることもある。

(3) 故障検出 (fault detection): 与えられた論理回路の入出力端子のみより、論理回路が正しく動作するかを検査することを意味する。

(4) 故障指摘 (fault location): 入力端子にテストパターンを入れ、その出力応答より、故障がある場合、その故障箇所を指摘することを意味する。一般には故障検出用のテストパターンですべての故障を指摘することは困難である。

(5) 診断辞書 (fault dictionary): 実際にプリントカードを修理する場合、一つ一つの故障について故障指摘を行なう必要はなく、ある交換単位 (たとえば IC) に故障指摘ができれば十分である。したがって診断辞書には、交換部品名とテストの関係が記述されていて、各テストの合否より可能性のある故障部品を見つけ出せるよう作られている。

(6) 同値故障 (equivalent failure): 縮退故障を回路から機械的に求めると、ある故障とある故障を本質的に区別することができない場合があり、このような故障を同値故障という。たとえば図 2.1(c) の場合 a: S-a-0, b: S-a-0, c: S-a-0 はどの入力パターンに対しても同じ出力を出すため、これら三つの故障を区別することはできない。また図 2.1(b) の場合、素子 A の出力と素子 B の C 入力 は 1 本の線のみで結ばれているため、A の出力故障と B の C 入力故障を区別することができない。このような同値故障に対しては、故障リストを作成する場合、一つの代表のみを残し、他はすべて除く操作が必要である。

以上の定義より、論理回路の自動検査方式は次のような操作により行なわれる。

(a) プリントカードの論理回路を解析し、各素子に関するすべての縮退故障を抽出し、同値故障がある場合にはその代表のみを残す。

(b) (a) で求めた故障に対し、プリントカードの入出力端子のみで、その故障を検出するテストパターンを求める。

(c) (b) で求めたテストおよび故障を部品の関係から、故障診断辞書を作成する。

(d) (b) で求めたテストパターンを実際に被検査プリントカードに与えるため、テストに受入れられる形式に変換する。また検査の結果、不良の場合には診断辞書を使ってどの部品が悪いかを指摘できるよう考慮する。

2.2 パラメトリックテスト

パラメトリックテストには、回路の波形の立上り、立下り、遅れ、負荷特性など動特性を検査するダイナミックテストと、抵抗やダイオードの抵抗値、ブリッジなどを検査するスタティックテストがある。

いずれの場合も、論理機能を検査するより、むしろ論理回路素子を 1 個 1 個検査することになり、同一機能を有する論理でも、部品構成により検査方法は異なる場合がある。したがって、このような検査では、ファンクションテストのように検査パターンを自動作成することはできないが、各回路素子 (たとえばダイオード・抵抗・IC など) の検査プログラムをあらかじめ用意し、マクロ命令としてアセンブラに登録しておくことにより、比較的簡単にプリントカードのテストプログラムを作成することができる。

本システムでは、M-7700 の主として CPU に使用しているプリントカードに対してパラメトリックテストを行なっている。このプリントカードは、IC のほか数多くの個別部品を積載しており、約 150 種類ある。

2.3 システム構成

このシステムは、プリントカードの自動検査に必要な各種情報を作成するソフトウェアと、プリントカードを実際に検査する計算機制御のテストから構成され、そのブロック図を図 2.2 に示し、テストの外観を図 2.3 に示す。図 2.2 に示すソフトウェアのうち、検査パターンの作成、故障診断辞書、テストプログラムの自動作成は M-7000 計算機により実行され、他のテスト周辺プログラム (アセンブラ・OS など) は、テスト用計算機 M-1530 によって作成されている。以下に図 2.2 に示す各ブロックの機能の概要を記述する。

論理図処理プログラム (LODS): 1 枚のプリントカードの設計データを論理図の形式でコーディングし、計算機に入力して、故障検査入力作成と辞書作成に必要な論理マスタファイル (コネクタリスト) を作成するプログラムである。設計変更の場合には、変更部分のみをコーディングし、ファイルを修正することができ、また論理図形式の入力のほかに、コネクタリスト形式で入力することも可能である。このプログラムで図面上の形式的な誤りはすべてチェックされる。

検査パターン生成プログラム: 上記 LODS により作られたマスタファイルを

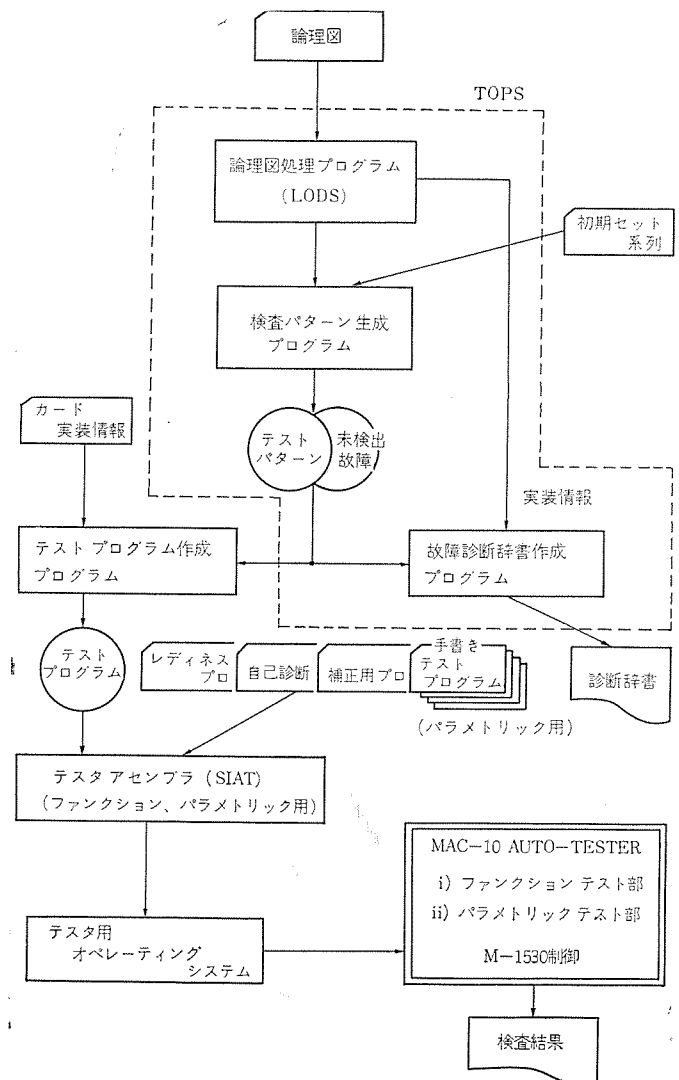


図 2.2 カード検査システムブロック図
Block diagram of PCB test system.

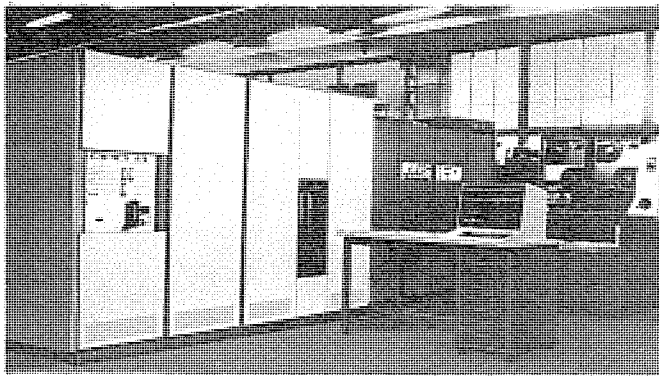


図 2.3 MAC-10 テスタ
MAC-10 tester.

故障をすべて抽出し、これらの故障を検出する検査パターンを求めるプログラムである。検査パターンを求めるため、その手法として、順序回路に拡張した D-アルゴリズム および故障 シミュレーション法を使用している。拡張 D-アルゴリズムは、解析的に一つ一つの故障に対する検査入力を求める手法であり、故障シミュレータは一つの任意の入力パターンに対し、そのパターンがどれかの故障を検出できるかを調べ、もしこのパターンが故障を発見することができれば、検査パターンとする発見手法である。このような性質より、拡張 D-アルゴリズムは比較的小規模な論理回路に適し、故障シミュレータは比較的大規模な論理回路に適している。

故障診断辞書作成プログラム：拡張 D-アルゴリズム および故障シミュレータにより求められた検査パターンとそのパターンで検出される故障の集合より、故障部品を指摘できるよう検査と故障部品の関係を辞書形式に印刷するプログラムで、この辞書により、プリントカードの検査結果、不良の場合、テストからのメッセージを見出しとして辞書を引くことにより、可能性のある故障部品（必ずしも 1 個の部品とは限らない）を抽出することが可能となる。

以上に記したプログラム群は、テストが任意の入力パターンを被検査カードに印加でき、出力パターンを正しい結果と比較し、合否を判定できる機能を持っていれば、本システムのテスト以外にも使用することができ、はん用性があるので、これらのプログラム群を TOPS (Test Organization Program System) と呼び、他のプログラムと独立に使用できるように作られている。また、これらプログラムはすべて M-7000 FORTRAN で書かれ、一般性を持たせている。

テストプログラム作成プログラム：TOPS で作られた検査パターンとプリントカードの各入出力端子の実装情報より、テストが実行するテストプログラムを作成するプログラムであり、各テストの合否を判定し、辞書の見出しを作成するプログラム作成機能も持っている。

テストアセンブラ (SIAT)：MAC-10 テスタのためのテスト用アセンブラで、M-1530 SIA を基本とし、テスト用マクロを追加したもので、このアセンブラには、論理機能検査のためのファンクションテスト用アセンブラと、回路パラメータ検査のためのパラメトリックテスト用アセンブラがある。またテストの保守および修理のため、このアセンブラで書かれた次のプログラムが準備されている。

- (a) ファンクションテスト用セルフテストプログラム
- (b) パラメトリックテスト用セルフテストプログラム
- (c) パラメトリックテスト用キャリブレーションプログラム

テスト用オペレーティングシステム：オペレーティングシステムはライブラリ化されたテストプログラムテープよりテストステーションで指示された被検査カードのテストプログラムを読み出し、そのプログラムを実行するもので、

おもに操作者とテストのコミュニケーションを行なうプログラムである。

MAC-10 テスタ：M-1530 により制御されるテストで、操作卓としてファンクションテストステーションおよびパラメトリックテストステーションを持ち、最大 4 台の独立に操作可能なテストステーションを接続することのできるはん用論理カードテストである。

3. 検査パターンの自動生成 (TOPS)

3.1 設計条件

本システム使用のために必要なプリントカードの設計条件には、ソフトウェアから生じる条件と、テストハードウェアから生じる条件があり、それぞれ異なった条件を持っている。本節では TOPS を中心とするソフトウェアからくる制限条件について述べ、テストハードについては、5.1 節に記す。

TOPS 使用のための制限条件を表 3.1 に示す。表 3.1 において、正確な最大素子数は次の式で与えられる。

故障シミュレータの場合

$$n_G + n_I + n_0 + 2n_F \leq 2000$$

拡張 D-アルゴリズムの場合

$$n_G + n_I + \sum_{i=1}^{n_F} W_i + 5n_E \leq 1000$$

ただし

n_G : ゲート数

n_I : 外部入力端子数

n_0 : 外部出力端子数

n_F : フリップフロップの数

n_E : EOR の数

W_i : 11 JKFF で Direct Set があるとき

W_i : 9 JKFF で Direct Set がないとき

表 3.1 には主として回路規模からくる設計条件を記したが、順序回路についてはプログラムのロジック上、さらに次の条件がある。

- (1) クロック信号は 1 種類であること。
- (2) フリップフロップのクロック端子にはクロックパルスのみを接続すること。レベル信号の立上り、立下りによるクロックトリガは原則として現プログラムでは取扱えない。
- (3) 順序回路の初期セットは簡単に行なえ、しかも初期セットが

表 3.1 プログラム上の制限条件
Design restriction of TOPS.

項 目	故障シミュレータ	拡張 D-アルゴリズム	備 考
素 子 数	max 約 2,000	max 約 1,000	本文参照
外 部 入 力 端 子 数	max 128		
内 部 出 力 端 子 数	max 128		
シミュレーションクロック数	max 50	max 40	故障を検出するためのクロック数
ゲート段数/クロック	max 35	max 50	1クロック間のゲートの段数
入 力 端 子 数/素 子	max 12		1素子当たりの入力端子数
WIRED AND の 数	max 50	max 20	
フリップフロップの数	max 128		
取扱える論理素子の種類	AND, OR, NOT, NAND, NOR, EOR, AMP, WIRED-AND, JKRSFF		
論 理 方 式	組合せ回路と同期式順序回路		順序回路についてはさらに制限あり、本文参照

正しくされたことを外部出力端子より観測できること。

(4) 各信号はすべてクロックに同期して変化すること。デレイ回路は原則として無視される。

(5) クロック端子を使用しないフリップフロップ(RS FF)の場合には、このようなフリップフロップと組合せ回路のみで帰還回路(ループ)を作らないこと。

以上のほかに故障検出率(脚注2)を上げるため、および故障指摘率(脚注3)を上げるため、できるだけ次の条件を満足するよう設計することが望ましい。

(a) 各フリップフロップは、できるだけ少ないクロック数で外部端子より制御できること。

(b) 各素子、特にフリップフロップについてはできるだけ多くの出力を外部出力端子に出すこと。

(c) できるだけ外部入出力端子のない長いゲートや、フリップフロップの直列接続回路を作らないこと。

また表2.1に示した論理素子の種類以外の素子については原則として取扱えないが、表2.1の素子を使って等価変換することにより取扱うことが可能となる場合がある。(たとえばDまたはTフリップフロップや各種MSIなど)。

3.2 入力

TOPSの入力処理のためにLODSが使用され、LODSについてはすでに文献(1)に詳細に記述されている。TOPSが必要とする入力情報は論理素子に関し、固有名、論理機能、実装位置、端子番号、端子名および接続情報で、接続情報には信号名・外部端子名・線分特殊点(交差・屈折・分岐点)があり、その他にプリントカード名などがある。これらの情報を含む論理図コーディングの形式を図3.1に示し、LODSによる論理図のプリント

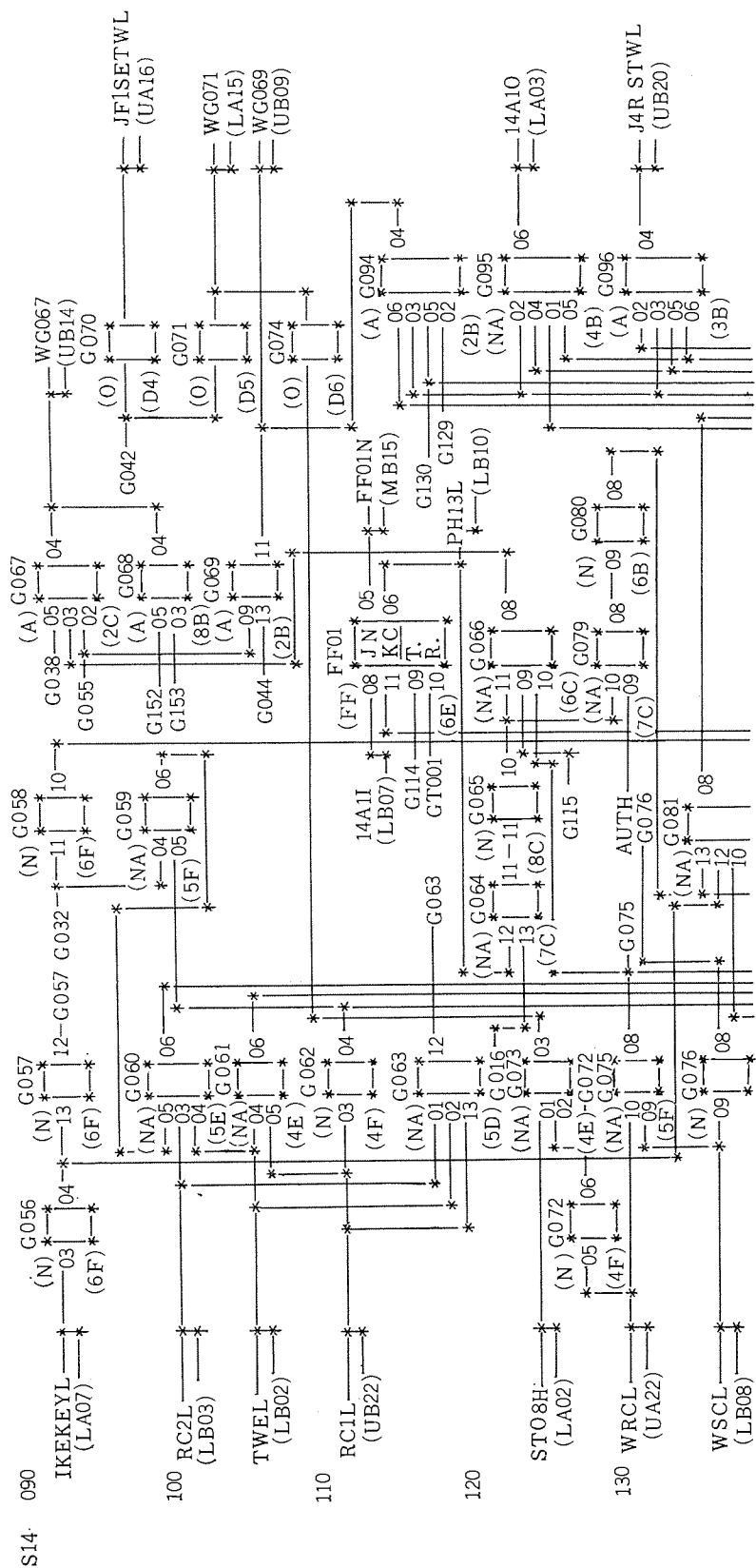


図 3.1 LODS によるコーディング例

Example of LODS coding.

(脚注2:) すべての故障の数と TOPSにより求めたテストパターンにより検出できる故障の数との比。

(脚注3:) テストパターンにより1個のみの故障部品を指摘することができる割合。

ことは不可能であり、このため、一般的には繰返しのない疑似乱数を入力し、必要な検出率または与えられた時間のみ検査パターン作成を試みる方法がとられている。本プログラムは、上記の機能の他に人手により未検出故障を求める手段として、人手により入力パターンと内部状態を与え、未検出故障に対する検出パターンを作成する機能を持っている。また、本シミュレータは各信号の論理値を1ワード中の1ビットに割当てることにより、1回のシミュレーションで32ケース(1ワード=32ビット)の異なる入力パターンを、シミュレーションできるように作られている。

(5) 拡張 D-アルゴリズム: IBM の J. P. Roth が開発した組合せ回路用の D-アルゴリズムを基本として、順序回路用に拡張したものであり、その方法は、一つの故障が与えられると、その故障が外部出力端子に伝ば(播)し、かつ、その故障箇所より、その故障を検出する入力パターンを求めるよう、回路を順次探索し、検査パターンを求める方法である。このとき故障が入力端子および出力端子まで伝ばするためには、順序回路の場合、複数クロック必要の場合があり、組合せ回路の場合と比較し、故障伝ば経路探索が非常にむずかしくなる。

組合せ回路の D-アルゴリズムから順序回路への拡張の方法は、フリップフロップなど記憶素子論理を組合せ回路化し、内部状態についてはクロックが入ったとき、次の状態に移移するよう制御する等価回路変換の方式をとっている。

本システムは上記二つの故障検査入力作成プログラムを準備し、回路の規模および性質により、使用者はいずれかまたは両方を使用できるようにになっている。しかし、いずれの方法でも、順序回路の場合には、すべての故障に対し検出するテストパターンを求めることができないとは限らない。またいずれのプログラムも回路に記憶素子を持つ場合、使用者が記憶素子の初期状態を外部より与えなければならない。

(6) REDUCTION: D-アルゴリズムは、その方式より、一つ一つの故障に対して検査パターンを求めているので、故障の数が n 個あれば n 個のパターンが求められる。また一般に、一つの故障を検出するため、すべての入力端子に固定した値(0/1)を与える必要がなく、故障が伝ばする回路のみ“0”や“1”を与えるので、他の端子は“0”でも“1”でもよい場合(この値を X と呼ぶ)がある。したがって、この X を使って入力検査パターンを圧縮することができ、

このプログラムはこの操作を行なっている。

(7) D-シミュレータ: 拡張 D-アルゴリズムにより求めた検査パターンを圧縮しても、すべての入出力端子に“0”または“1”が割当てられるとは限らない。しかし、テスト入力としては、すべての入力端子に定まった値を入れ、すべての出力端子に対する正しい出力応答をあらかじめ求めておき、テストによる検査結果と比較し、検査の可否を判定する必要がある。また拡張 D-アルゴリズムは初期セットが正しく行なわれると仮定して故障検出パターンを求めているが、実際の検査の場合には、故障の位置により、必ずしも常に正しく初期セットが行なわれるとは限らない。また REDUCTION により圧縮されたテストパターンは場合により、あるクリップフロップにとって禁止入力となる可能性がある。これらの理由により、D-シミュレータは入力パターンの X の値を0または1にセットし、初期セット系列を含めてシミュレーションを行ない、検査パターンの有効性を検証するプログラムである。

(8) TMIN (Test Minimization): 故障シミュレータは32個のパターンを単位として検査パターンを並列に求めているため、32個のパターンのうち、検査パターンとして無効なパターンが生じる場合がある。また、拡張 D-アルゴリズムの REDUCTION 同様、テストパターンが圧縮できる場合がある。また、並列シミュレーションの性質より、テストパターンのフォーマットは各ワードが各端子に対応するため、テストプログラム作成上、不都合であり、REDUCTION 結果の出力フォーマットと異なるため、テストパターンのフォーマット交換の必要がある。さらにテストパターンとして完全なものにするため、初期セット系列を付加する必要がある。このプログラムは以上のような機能を持ち、このプログラムの出力フォーマットを D-シミュレータの出力フォーマットと同一にして、TO PS の出力ファイルとしている。

(9) 故障診断辞書作成プログラム: 診断辞書は検査と故障部品の関係を表にしたもので、辞書としてはできるだけ一つの部品不良を指摘できることが望ましい。診断辞書のための情報としては、故障部品に対し、テスト番号・検査クロック・故障を指摘できる出力パターン、その出力の論理値と多くの情報を使用することができ、各故障に対する出力パターンを、すべて印刷し辞書とすることは大規模プリントカードの場合、非常に多くの情報となり、処理時間が長すぎる場合がある。したがって、本システムでは各テストの可否の組合せの

**** THE CIRCUIT *** ITS FAULT TABLE ***							
THE NUMBER OF PRIMARY INPUT PINS = 12							
THE NUMBER OF PRIMARY OUTPUT PINS = 72							
THE NUMBER OF COMBINATIONAL GATES = 175							
THE NUMBER OF FLIP - FLOPS = 61							
** FAULT TABLE **							
NO.	GATE	PIN	MODE	NO.	GATE	PIN	MODE
1	B0706	OUT	0	2	B0706	OUT	1
4	T1FCAC4H	IN=B0706	1	5	T1FCAC4H	OUT	0
7	A0986C	OUT	0	8	A0986C	OUT	1
10	T1FCAC1H	IN=B0706	1	11	T1FCAC1H	OUT	0
13	B0986C	OUT	0	14	B0986C	OUT	1
16	T1FCAC5H	IN=B0706	1	17	T1FCAC5H	OUT	0
19	B0486C	OUT	0	20	B0486C	OUT	1
22	T1FCAC4H	IN=B0706	1	23	T1FCAC4H	OUT	0
25	C0486C	OUT	0	26	C0486C	OUT	1
28	T1FCAC3H	IN=B0706	1	29	T1FCAC3H	OUT	0
31	E0886C	OUT	0	32	E0886C	OUT	1
34	B0286H	IN=B0706	1	35	B0286H	OUT	0
37	T1FV886H	OUT	0	38	T1FV886H	OUT	1
40	D0908	IN=T1FCAC4H	1	41	D0908	IN=T1FCAC3H	1
43	D0908	IN=T1FCAC4H	1	44	D0908	OUT	0
46	B0708	OUT	0	47	B0708	OUT	1
49	J0511	OUT	1	50	T1C59V6L	IN=J0511	1
52	T1C59V6L	OUT	0	53	T1C59V6L	OUT	1
55	C1406	OUT	1	56	C1286H	IN=C1406	0
				57	C1286H	IN=C1406	1

図 3.4 故障リスト

Example of failure list.

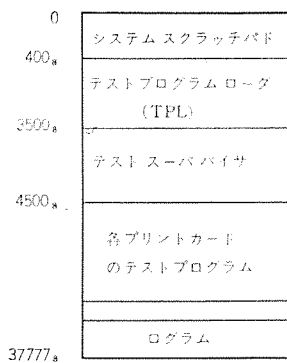


図 4.3 オペレーティングシステムのメモリマップ
Memory map of test operating system.

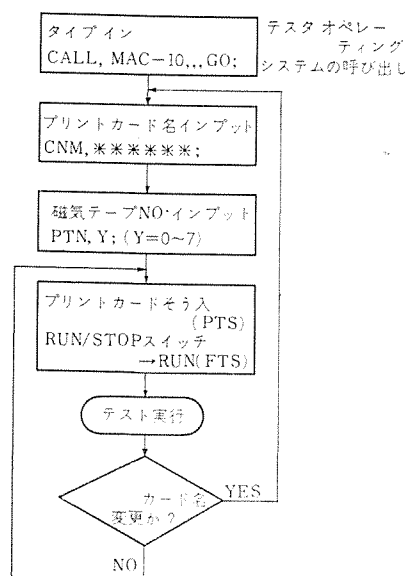


図 4.4 テスタの操作法
Operation flow of the tester.

(2) パラメトリックテストステーション用キャリブレーションプログラム

(3) ファンクションテストステーション用セルフテストプログラム

(1), (3)は各ステーションの完全性を検査するプログラムで、オペレーティングシステムによって定期的に呼び出され実行される。これらのプログラムは各リレー、テストソケットの接触抵抗、電源電圧、入出力回路の電圧レベル、タイミングのチェックを行なう。これらのプログラムの実行時には、各テストソケットにセルフテスト用の特殊プリントカードをそう入する必要がある。(2)はテストの各D/A変換回路の零点の相互関係を調整するためのプログラムである。

5. テスタハードウェア

5.1 構成と性能

MAC-10 テスタの構成ブロック図を図 5.1 に示す。カード検査をするとき、ファンクションテストの場合、ファンクションテスト用のテストソケット、ファンクションテスト用操作卓、故障内容表示のためラインプリンタ、テストプログラムロードのために磁気テープ装置が使用され、パラメトリックテストのためにはパラメトリックテスト用のテストソケット、操作卓としてタイプライタ、故障表示のためテストソケットパネルに取付けられたストリッププリンタ、テストプログラムロードのために磁気テープ装置が使用され、お互いに完全に独立に操作できるように作られている。またファンクションテストステーションは、さらに、2台接続することが可能であるファンクションおよびパラメトリックテストのためのハードウェアの性能を表 5.1, 5.2 に示す。

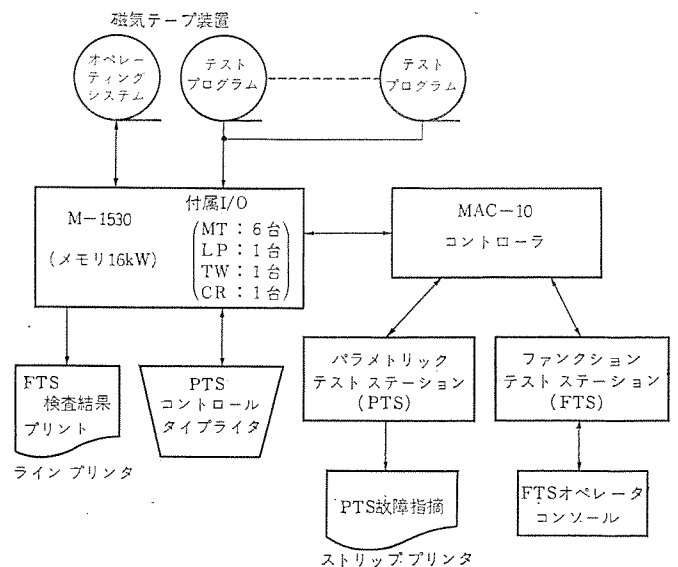


図 5.1 MAC-10 テスタの構成
Block diagram of MAC-10 tester.

表 5.1 ファンクションテストステーションの性能
Specification of function test station.

項 目	性 能
検 査 容 量	最大 200 ピン
検 査 速 度	2 分/1 枚 (100 ピン)
論 理 入 力 電 圧	(HIGH) 0~5.5 V (50 mV ステップ可変) (LOW) 0~5.5 V (50 mV ステップ可変)
サ ン プ ル 時 間	500 ns~100 ms (可変)
出 力 測 定 精 度	±30 mV
出 力 測 定 レ ン ジ	-10~+10 V
被 検 査 カ ー ド 用 電 源 (3 種 類)	① -15~+15 V, 2 A (50 mV ステップ可変) ② -15~+15 V, 2 A (50 mV ステップ可変) ③ -15~+50 V, 2 A (100 mV ステップ可変)

表 5.2 パラメトリックテストステーションの性能
Specification of parametric test station.

項 目	性 能
検 査 容 量	52 ピン
検 査 速 度	20 秒/1 枚
論 理 入 力 電 圧	(HIGH) 0~+8 V (32 mV ステップ可変) (LOW) -4~+4 V (32 mV ステップ可変)
入 力 タ イ ミ ン グ	0~128 ns (1 ns 可変) 最小パルス幅 24 ns, 精度 ±1 ns
サ ン プ ル 時 間	0~32 μs (1 ns ステップ可変)
出 力 測 定 精 度	±13 mV±0.6% of Value, ±3 ns
出 力 測 定 レ ン ジ	-8~+32 V
被 検 査 カ ー ド 用 電 源	① +4 V, ② +8 V, ③ -8 V, ④ +25 V, ⑤ -25 V (共に ±10% 可変)

ファンクションテストステーション (FTS) とパラメトリックテストステーション (PTS) のハードウェアは、完全自動検査とはん(汎)用性の目的よりテストソケットおよびオペレータパネルに次の特長をもっている。

PTS のテストソケットはプリントカードをそう入すると、マイクロスイッチとマグネットの働きにより、被検査カードのピンをソケットが自動的に圧着し、レディ状態にする。検査が終了するとオペレータパネル上の合格“PASS”または不合格“FAIL”のランプが点灯し、テストソケットが開く(図 5.2 参照)。“PASS”の場合には自動的にプリントカード上にスタンプが押され、“FAIL”の場合にはオペレータパネルに取付けられたストリッププリンタによって故障箇所が指摘される。FTS のテストソケ

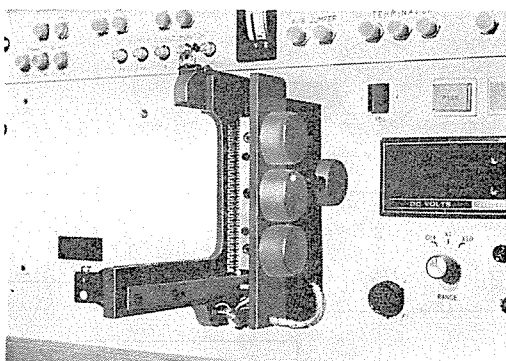


図 5.2 PTS のテストソケット
Test socket of PTS.

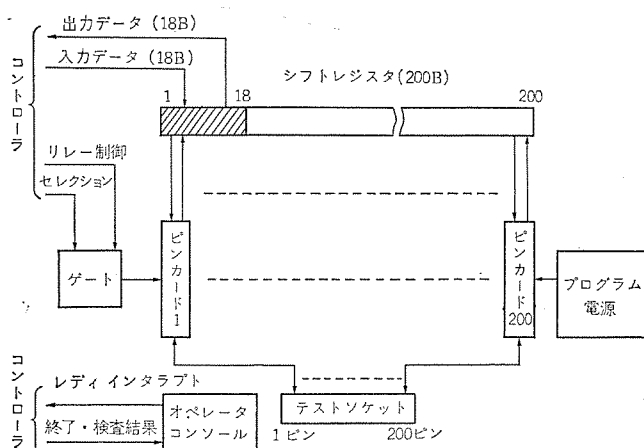


図 5.3 ファンクションテストステーションの構成
Block diagram of function test station.

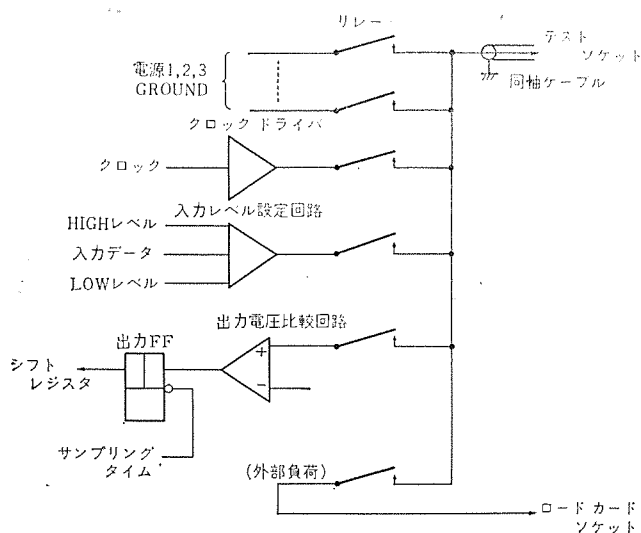


図 5.4 ピンカードの機能
Function of a pin card.

ットは種々の形状のプリントカードを検査できるよう交換が容易な二重構造になっている。

5.2 ファンクションテストステーション

ファンクションテストステーションは、被検査カードの各1ピンに8種類の機能を与えるための各ピンに対応するピンカード、コントローラからのデータを並列にすること、および検査結果のデータを直列にコントローラに送り出すための200ビットのシフトレジスタ(図5.3)、操作者とテスト間の情報伝達のためのオペレータコンソールおよびこれらのためのロジックから構成される。ピンカードからテストソケットへは、図5.4に示すよ

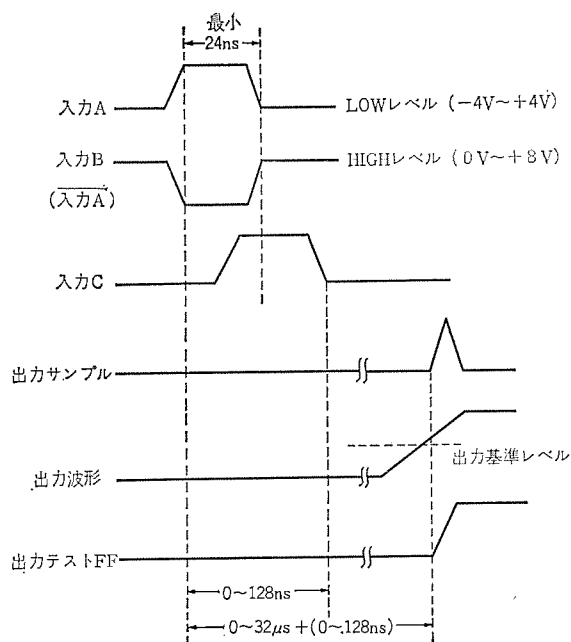


図 5.5 パラメトリックテストステーション 入出力回路 タイミング
Timing diagram for parametric test station.

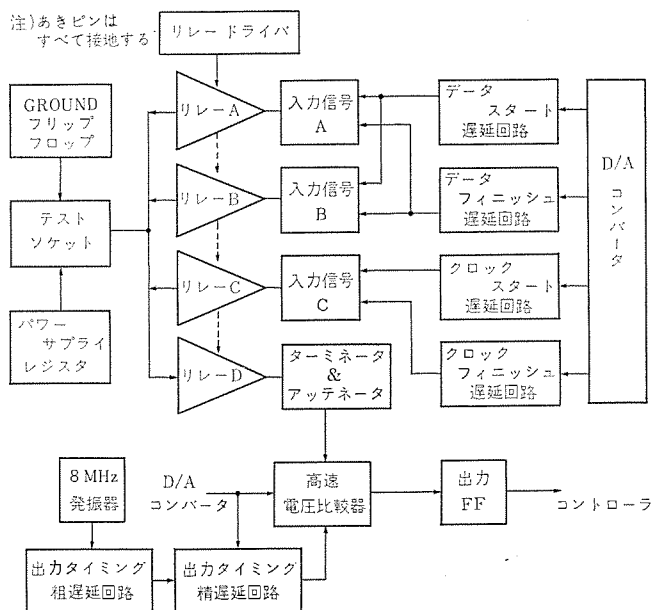


図 5.6 パラメトリックテストステーションのテスト回路部
Block diagram of parametric test station.

うに特性インピーダンス75Ωの同軸ケーブルで接続され、各ピンごとに8種類の機能を与えることができる。各機能の接続は信頼性および性能より、水銀封入リレーが使われている。FTSのブロック図を図5.3に、各ピンカードの八つの機能の内容を図5.4に示す。

5.3 パラメトリックテストステーション

PTSの電気回路は三つの入力信号発生器と一つの出力信号検出回路からなり、そのおのおのはリレーによって任意の被検査カードのピンと接続される。入力信号はタイミング、“1”と“0”の電圧レベルおよび入力パターンの種類、出力回路は基準電圧レベルおよびサンプリング時間がプログラム可能である。入力信号と出力サンプリングの電圧とタイミングの関係を図5.5に示し、PTS回路のブロック図を図5.6に示す。

5.4 テスタコントローラ

コントローラはテストステーションとM-1530のインタフェースであり、計

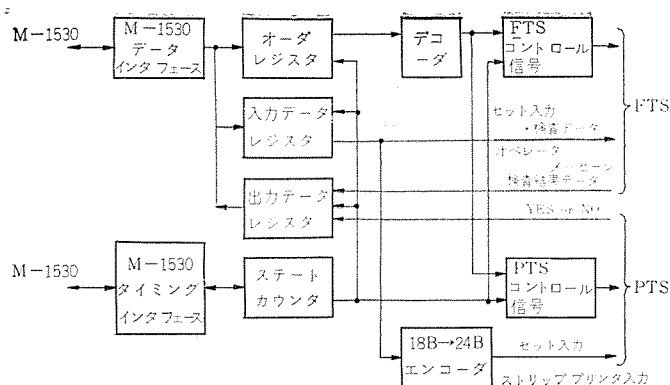


図 5.7 コントローラの概略ブロック
Block diagram of test controller.

算機よりの命令をデコードしてステーションを制御し、またステーションよりの検査データ、操作者の指示を M-1530 に伝達する。テスト用の M-1530 の命令として、コマンドとオーダの 2 種類があり、コマンドは他の I/O 命令と同等のもので、テストの“START”、“HALT”および“BUSY”、“INOPERATIVE”のステータステストのみである。オーダは各ステーションの動作内容を指示するための命令であり、テストのためのデータとともに WO (ワードアウト)、BO (ブロックアウト) の機能によってコントローラに転送される。各オーダは“START”と“HALT”のコマンドの間にデータとともに転送され、コントローラは定められたシーケンスに従ってオーダをデコードし、その機能に応じてデータをステーションに送る。オーダは 1 ワードで構成され PTS のために 18 種、FTS のために 16 種ある。なおテスト保守のために、M-1530 と独立に手動でステーションを動作させることのできるメインテナンスパネルをコントローラは持っている。コントローラの概略ブロック図を図 5.7 に示す。

6. 実施例および性能

6.1 検査パターン生成

TOPS は、所内で製作されているミニコンピュータ M-70、キャラクタディスプレイ M-340、小形計算機 M-88、野外用 FDC 計算機のプリントカードの検査パターン作成に使用されている。表 6.1 からわかるとおり、大規模カードには故障シミュレータを使用し、小規模カードには拡張 D-アルゴリズム、中規模カードには故障シミュレータと拡張 D-アルゴリズムを共に使用し、小規模から大規模までのプリントカードをカバーするとともに、いずれの場合にも、ほぼ満足すべき故障検出率を得ている。

故障検出率は論理回路の規模やフリップフロップの数、故障検出に必要なクロック数などにより異なるが、検査のために考慮して設計すれば、ほぼ 80~100% の検出率を得ることができる。

故障シミュレータ・拡張 D-アルゴリズムを使用して検査パターンを求めた実施例を表 6.1 に、実行結果の例を図 6.1 に示す。

6.2 検査時間

検査時間はパラメトリック、ファンクションテスト共に次の式で与えられる。

検査時間 = 操作時間 (カード名のキーインとカードの抜き差し)

+ サーチ時間 (プログラムを磁気テープからロード)

+ プログラム実行時間 (テストプログラムの実行時間)

操作時間はファンクションテストの場合、負荷接続のため、必要によりロードカードのそう入、パラメトリックの場合には、必要によりケーブルコネクタの接続の必要があるが平均約 1 分、サーチ時間は平均約 30 秒である。プログラムの実行時間はパラメトリックテストの場合には回路の規

表 6.1 TOPS の実施例
Samples of TOPS execution.

機種名	カード No.	ゲート数	フリップフロップ数	外部入力端子数	外部出力端子数	故障数	使用プログラム	実行時間 (分)	故障検出率 (%)
M-70	EX 1	388	45	81	139	1,600	F	83	71
	2	353	24	152	66	1,498	F	69	78
	3	449	11	126	56	1,451	F	70	79
M-80	EX 4	44	7	19	12	157	F	8	75
	4	44	7	19	12	157	D	4	89
	4	44	7	19	12	157	F-D	9	94
	5	176	3	41	44	468	F-D	18	98
	6	180	6	32	46	451	D	9	92
	7	132	0	55	26	317	D	6	100
	8	50	1	29	10	128	D	2.5	97
FDC	9	31	4	22	27	94	D	2.0	97
	10	25	0	11	13	89	D	1.8	100

注) 1. 使用プログラム : F=フォールトシミュレータ

D=D-アルゴリズム

2. 故障数には一部冗長故障も含まれるので、実際の故障検出率は本表より数%高くなるものもある。

図 6.1 フォールトシミュレータの結果例
Example of statistics list of fault simulator.

模、ファンクションテストの場合には、検査パターンの数に依存するが、中規模のプリントカードの場合には、ほぼ 30 秒程度でプログラムを実行することができる。

以上より、1 枚のプリントカードの検査時間は平均 2.5 分から 3 分程度であり、1 日平均約 250 枚程度の検査を行なうことができる。

具体例としてパラメトリックテストの場合

回路種類 : カウンタフリップフロップ

素子数 : ダイオード (136 個)、IC (4 個)、抵抗 (50 個)

のプログラム実行時間は約 30 秒であり、

ファンクションテストの場合

回路種類 : コントロールレジスタ

素子数 : IC (16 個)

検査パターン : 27 種 (91 クロック分)

のプログラム実行時間は約 20 秒である。

7. む す び

以上論理 プリントカードの自動検査システムの概要について記述した。最近の論理 プリントカードは MSI, LSI の普及に従います大規模となり、故障検出率および指摘率の高い検査 パターンの自動作成は困難となりつつある。したがって、検出率・指摘率を上げるためには、TOPS により検出故障を求め、未検出故障に対しては、人間が検査パターンを求めるか、あるいは検査が容易なように設計変更を行なう必要が生じてくる。表 6. 1 の例は 1 回の TOPS の試行のみで求めた例であるが、さらに人手による検査 パターンのそう入および簡単な設計変更(たとえば未検出故障部分の回路の出力を端子に出すこと)により、故障検出率をさらに向上できることがわかっている。

このためには、システムとして人手介入を容易にし、設計者が検査情報作成と設計照査のために TOPS を設計の道具として随時、簡単に使用できるよう システム を改善することが望まれている。

また現在のシステムでは、クロックの制御や エッジトリガタイプの フリップフロップの取扱いが一部困難な場合があるが、これらに対しても取扱えるよう改善が望まれている。これらの改善事項はいずれも理論的にむずかしい問題であるが、検査の完全自動化を目標とし TOPS Version-II を研究、開発中である。

最後に本システム開発の一部を担当くださった現米国 IBM 社の三上晃一氏および イリノイ大学へ留学中の村井主任に謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 小島, 三上ほか: 論理図を入力データとする自動設計システム (LODS), 三菱電機技報, 45, No. 3 (昭 46)
- (2) H. Y. Chang, E. G. Manning, G. Metz: Fault Diagnosis of Digital Systems Wiley-Interscience, New York (1970)
- (3) G. R. Putzolu, J. P. Roth: A Heuristic Algorithm for the Testing of Asynchronous Circuits, IEEE, Trans. on Computers, C-20, P 639 (1971)
- (4) J. P. Roth, W. G. Bouricius, P. R. Schneider: Programmed Algorithms to Computer Test to Detect and Distinguish between Failures in Logic Circuit, IEEE, Trans. on Electronic Computers, EC-16, P 567 (1967)
- (5) 小島, 田中, 金田: 順序回路に適した故障診断の考察, 信学論 (D), 55-D, 1, P 39 (昭 47-01)
- (6) C. Tanaka: Parallel Simulation of Digital Systems, DCS Report, 382, Univ. of Illinois (1970)
- (7) T. R. Blokeslee: Computer-Oriented System Speeds Testing of Circuits and Components, Electronics, p 72 (July, 1968)
- (8) E. de Atley: LSI Testing is a Large-Scale Headache, Electronic Design, p 24 (Ang., 1969)

原子吸光分析法の応用

島田 和彦*・吉留 昭男*

Application of Atomic Absorption Spectrometry

Manufacturing Development Laboratory Kazuhiko SHIMADA・Akio YOSHIDOME

Atomic absorption spectrometry has been used since 1960 for a determination of trace metal. Recently it has come into principal use for the determination of harmful metals in industrial waste water, soil and food to cope with the regulation set up against environmental pollution. Mitsubishi has been applying the method to determination of trace metals in phosphor, semiconductor and lamp materials. Furthermore, this spectrometry apparatus is installed in all of the works to examine the harmful metals in the drain water of the plant and in the soil, and also measure cadmium content in rice, thus playing an important part in the prevention of public nuisance.

This article reports the result of studies on the application of the atomic absorption spectrometry.

1. ま え が き

原子吸光分析法は、原子気体とその元素に固有な波長の光を吸収する現象を利用した分析法で、1955年 オーストラリアの A. Walsh より、その原理が発表された。その後、各国でこの方法の研究と装置の開発が行なわれた結果、微量金属の分析法として著しく発展し、現在では蛍光分析、比色およびポーログラフ分析にかわり、あらゆる分野で利用されている。

筆者らの研究室においても、早くから本法の利点について着目し、1963年から分光光度計の付属装置でガラス中の微量成分の定量に応用した。その後、原子吸光の専用装置が市販され、操作性が著しく向上するとともに、H. C. Lamp (中空陰極ランプ)の製作技術が進歩し、ランプの種類も多く市販されてきた。1968年筆者らも、この専用器を導入して各種の材料分析に応用した。特に、けい光体・半導体・ランプ材料など、電子材料中の微量金属の定量に用いて多くの成果を得ることができた。

また、近年公害が社会問題として非常に注目され、環境汚染に関する規制にともなって、排水、土壌あるいは食物中の有害金属の定量に原子吸光分析法がその主力をなしている。当社においても、公害防止に強力にとりくむため、1971年当研究室に本装置を増設し、公害に関する分析法について検討するとともに、種々の試料について分析した。現在、当社では、各製作所に本装置を設置して、工場排水および土壌中の有害金属、さらに米中のカドミウムの定量に用いて、公害防止に大きな役割りを果している。

本法では、これら原子吸光分析法の応用に関する検討結果について報告する。

2. 原理と特長

原子吸光分析法の原理に関しては、すでにいくつかの成書^{(1)~(3)}があるので、ここでは簡単にのべる。

いま、一定光源の光(振動数 ν 強度 $I_{0\nu}$)を、長さ l cmの原子蒸気層を通すと、その一部が吸収されて透過光の強度 I_ν は

$$I_\nu = I_{0\nu} \exp - K_\nu l \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

で与えられる。ただし K_ν は比例定数で、基底状態にある原子密度 N_ν と積分吸収率 $\int K_\nu d\nu$ は、次式で示される。

$$\int K_\nu d\nu = \frac{\pi e^2}{mc} N_\nu f \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ここに、
 e : 電子の電気量
 c : 光速
 m : 電子の質量
 f : 振動子強度

式(2.2)が原子吸光分析の理論式であり、積分吸収率は、基底状態にある原子の数と振動子強度の積に比例する。したがって積分吸収率を求めて定量することができるが、実際には原子吸光線幅が非常にせまく、正確に測定することが困難である。そこで吸光線の中心部で吸光係数(極大吸光係数 K_0)を測定する方法がとられている。これには、光源光として原子吸光線幅よりせまい H. C. Lampからの光を用いるため、原理的には、吸光光度法と同様に考えることができる。すなわち吸光度 A は次式で与えられる。

$$A = \log \frac{I_{0\nu}}{I_\nu} = 0.4343 K_0 \cdot l N_0 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

これは吸光光度法におけるベールの法則に相当し、吸光度 A と基底状態の原子密度 N_0 は、一次の直線関係にあり検量線をつくることができる。

本法のおもな特長として、

(1) 吸光光度法の吸収曲線は、分子の吸収であり吸収線幅が広いが、本法は原子の吸収であるため、吸収線幅が非常にせまく、さらに光源光も輝線スペクトルを用いるので、スペクトル的な干渉はほとんどない。

(2) 本法は、炎中でその数が圧倒的に多い基底状態の原子を扱うため、励起状態の原子を用いる蛍光法にくらべて定量値の信頼性が高く、また多くの金属元素を定量することができる。

3. 電子材料への応用

3.1 けい光体

けい光体中の微量金属の分析法として、従来、湿式分析あるいはポーログラフ分析が用いられているが、マトリックスの影響のためどうしても操作が煩雑となっていた。そこで原子吸光分析法について検討し、精度・迅速性とも好結果が得られた。

3. 1. 1 EL けい光体中の銅およびセレンの定量

薄形テレビのけい光面として、用いられるEL けい光体 (ZnS, Cu, Br または ZnS, ZnSe, Cu, Br) の輝度および劣化特性は、原料の配合組成あるいは合成条件に左右される。したがって EL けい光体の製造研究では、種々の実験条件における組成分析が必要である。

原子吸光分析によるセレンの定量法として、実試料への応用例は少ないが、筆者らは、EL けい光体中のセレンの定量法について検討した。

試料溶解で問題となるのは、セレンが揮散しやすいこと、および試料中に多量に含まれているいおう(硫黄)の処理方法である。これらのことを検討した結果、試料は逆王水(HNO_3 , 3 : HCl , 1) に溶解し、析出したいおうは臭素を滴下して溶解した。溶液は、さらに蒸発乾固近くまで濃縮するが、セレンの揮散を防ぐため蒸発乾固はしない。

原子吸光分析法における酸の影響として、塩酸および硝酸について検討した。セレン 40 ppm 溶液を、空気-水素炎を用いて測定した場合、塩酸は 0.8 N、硝酸は 0.6 N までその影響がなく、また、銅 1 ppm を空気-アセチレン炎を用いて測定した場合は、塩酸・硝酸とも 1.2 N まで影響がなかった。

共存元素の影響として、セレン 40 ppm に亜鉛 100 ppm、および銅 1 ppm に亜鉛とセレンが各 100 ppm 共存しても、その影響は認められなかった。

以上の実験結果から、EL けい光体中の銅およびセレンの分析法を次のように定めた。

けい光体試料 0.2 g をとり、逆王水 10 ml を加え加熱して溶解し、いおうの凝集物を認めれば臭素を滴下する。加熱して溶液をしばらく煮沸したのち、溶液を蒸発させ乾固近くまで濃縮する。溶液を 250 ml のメスフラスコに移し、標線まで水を加える。この溶液を原子吸光用測定溶液として炎中に噴霧し、その吸光度からセレンおよび銅を定量する。本法による分析結果を表 3. 1 に示す。

この結果から、セレン 13 %、銅 0.28 % を含む EL けい光体の分析精度は、それぞれ標準偏差 0.16 %、0.002 % である。また、本法は、10 種のけい光体中のセレンおよび銅を 8 時間で定量することができる。

3. 1. 2 けい光体中のユーロピウムの定量

ユーロピウムは、けい光体中に添加され高圧水銀灯、あるいはカラーテレビの赤色けい光体などに用いられている。

原子吸光法によるユーロピウムの定量は、その応用例がほとんどない。筆者らは、バナジウム酸イットリウム(YVO_4 : Eu) およびりん酸ストロンチウムけい光体 [$\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$: Eu] 中のユーロピウムの定量法について検討した。測定条件を表 3. 2 に示す。

この測定条件は、炎の燃焼状態が安定している中で、最も高い感度を示した。表中のバーナ高さは、バーナ上 17 mm を光源光が通る高さである。

酸の影響として、塩酸、硝酸および硫酸について検討し、硝酸が最もその影響が少なかった。しかし、試料が塩酸によくとけることから、溶解には塩酸を用いることにした。この場合、酸濃度は 0.5 N 以下にする必要がある。酸の影響を図 3. 1 に示す。

また、ユーロピウムに対して、イットリウムとストロンチウムが正の干渉を示す。この原因は、ユーロピウムが高温のため炎中でイオン化するが、イットリウムまたはストロンチウムが存在すると、イオン化が抑制されて中性原子濃度がふえ吸光度が増加する。これらの干渉を図 3. 2 に示す。

表 3. 1 けい光体中のセレンおよび銅の分析結果
Analytical results of selenium and copper in phosphors.

実験回数	Se %	Cu %
1	12.85	0.276
2	12.78	0.276
3	12.81	0.279
4	13.06	0.279
5	13.13	0.279
平均値	12.93	0.277
標準偏差	0.156	0.0019
変動係数	1.21	0.70

(装置 N. J. A., AA-1 形)

表 3. 2 測定条件
Analytical conditions.

測定波長	4,594 Å
ホロカソードランプ	Eu
ランプ電流	6 mA
バーナ	スリット (0.4×50 mm)
バーナ高さ (装置目盛)	10 mm
アセチレン流量	3.8 l/min
亜酸化窒素流量	5.0 l/min

(装置 N. J. A., AA-1 形)

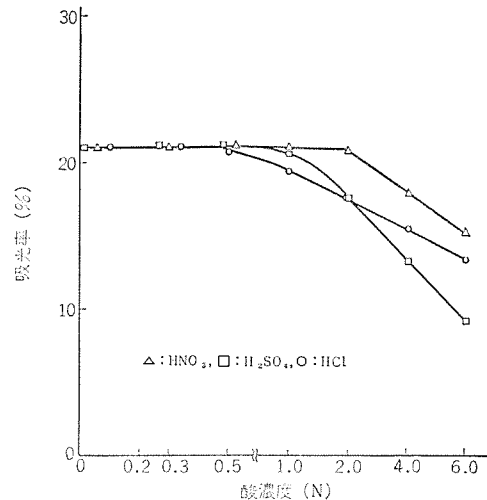


図 3. 1 ユーロピウムに対する酸の影響
Interference of acid on absorption of europium.

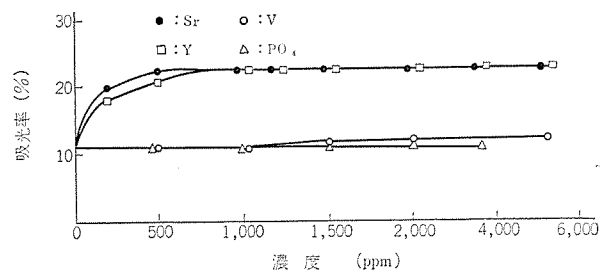


図 3. 2 Eu に対するストロンチウム、バナジウム、イットリウムおよびりん酸イオンの干渉

Interference of strontium, vanadium, yttrium and phosphete ion on absorption of europium.

す。これはイオン化ポテンシャルからも容易に推察することができる。この干渉を防ぐため、測定溶液中にカリウムを加えて測定した。

以上の実験結果から、けい光体中のユーロピウムの定量法は次のようにした。

けい光体試料 0.5 g をとり、少量の水を加えたのち、りん酸ストロンチウムけい光体の場合は、塩酸 (1+1) 5 ml を加え加熱溶解する。

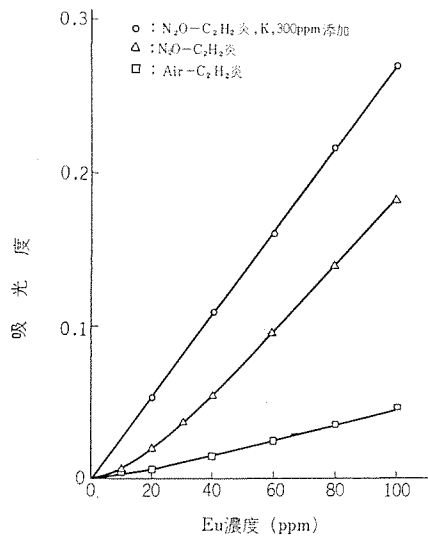


図 3.3 Eu 検量線
Calibration curves for europium.

表 3.3 けい光体中のユーロピウム の定量結果
Analytical results of europium in phosphors.

実験回数	バナジウム酸イットリウムけい光体 Eu ₂ O ₃ %	りん酸ストロンチウムけい光体 Eu ₂ O ₃ %
1	4.45	0.49
2	4.54	0.49
3	4.54	0.49
4	4.56	0.50
5	4.54	0.51
平均値	4.53	0.50
標準偏差	0.044	0.01
変動係数	0.97	2.00
配合組成比	4.45	0.40

表 3.4 添加実験結果
Experimental results of europium added to phosphor.

実験 No.	Eu ₂ O ₃ %			測定値 %	差
	試料中	添加量	全量		
1	3.84	0.5	4.34	4.35	+0.01
2	3.84	1.0	4.84	4.90	+0.06
3	3.84	1.5	5.34	5.40	+0.06
4	3.84	2.0	5.84	5.83	-0.08
5	3.84	2.5	6.37	6.21	-0.13

溶液を 100 ml のメスフラスコに移し、カリウム濃度が 300 ppm になるように塩化カリウムを加え、標線まで水でうすめ測定溶液とする。また、バナジウム酸イットリウムけい光体の場合は、塩酸 (1+1) 20 ml を加えて溶解したのち、溶液を 100 ml に希釈する。この溶液 20 ml を 100 ml のメスフラスコに分取し、りん酸ストロンチウムけい光体の場合と同様に、カリウムを加えて測定溶液を作製する。これらの溶液を測定条件にセッとした原子吸光装置により、炎中に噴霧し吸光度を求め、検量線からユーロピウムを算出する。検量線を図 3.3 に、定量結果を表 3.3 に示す。さらにけい光体中に既知量のユーロピウムを添加した定量結果を表 3.4 に示す。

3.2 半導体

原子吸光分析法は、定量感度が高いことから、半導体の分析にもしばしば用いられている。本報では、シリコン酸化膜中の超微量ナトリウムの定量と、カルコナイトガラスの分析法について報告する。

3.2.1 シリコン酸化膜中の超微量ナトリウムの定量

シリコンプレーナトランジスタや、IC の表面は、厚さ 1,600 Å 程度のシリコン酸化膜でおおわれ、表面を保護するとともに電気特性および信頼

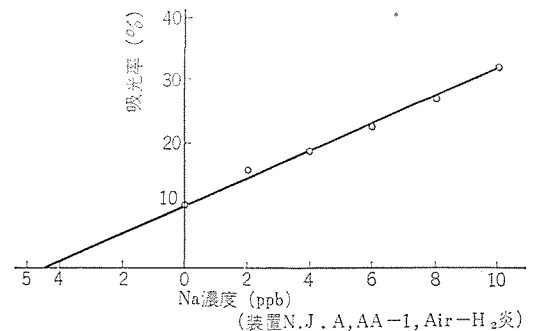


図 3.4 添加法による Na の定量
Determination of sodium by addition method.

表 3.5 純水中のナトリウム の定量結果
Determination of sodium in pure water.

純水	Na 量 (ppb)
イオン交換水	8.0
イオン交換水を蒸留	4.0
Banstead 純水器 (採水時 8 MΩ/cm ²)	4.5

表 3.6 シリコンウエハ 中のナトリウム の定量結果
Analytical results of sodium in silicon wafer.

試料	実 験 No.	原 子 吸 光 分 析		放 射 化 分 析 atom/cm ²
		溶 液 濃 度 ppb	atom/cm ²	
A	1	2.4	2.2×10 ¹³	1.8±0.4×10 ¹³ 2.6±0.5×10 ¹³ 6.8±0.8×10 ¹³ 3.7(σ=2.2)×10 ¹³
	2	1.6	1.5×10 ¹³	
	3	1.1	1.0×10 ¹³	
	平 均 値	1.7	1.6×10 ¹³	
	1			
	2			
B	2	4.8	4.5×10 ¹³	
	3	5.0	4.7×10 ¹³	
	平 均 値	4.9	4.7×10 ¹³	
	平 均 値	4.9	4.6×10 ¹³	
C	1	4.0	3.7×10 ¹³	
	2	3.0	3.0×10 ¹³	
	3	0.8※	—	
	平 均 値	3.5	3.4×10 ¹³	
D	1	2.8	2.6×10 ¹³	
	2	1.0	0.93×10 ¹³	
	3	2.6	2.4×10 ¹³	
	平 均 値	3.2	1.97×10 ¹³	

A : 熱酸化シリコンウエハ
B, C, D : 汚染したシリコンウエハ
※ 平均値から除外した。

度の向上を計っている。しかし、製造工程において酸化膜中に微量不純物が混入し、電気特性、とくに寿命特性にきわめて悪い影響を及ぼす。この汚染元素の一つとしてナトリウムがある。

シリコン酸化膜中の超微量ナトリウムの定量には、放射化分析が用いられているが⁽⁴⁾、分析所要時間がながく、また、費用がかかる欠点がある。そこで原子吸光法による定量について検討した。

超微量ナトリウムの定量で問題となるのは、使用純水中のナトリウムである。そこでイオン交換水と、さらにそれを石英蒸留器で蒸留したもの、および Barnsted 超純水製造装置により作った純水について、ナトリウムの含有量を比較した。なお、定量のため Barnsted 純水装置により得た純水に既知量のナトリウムを添加し、図 3.4 に示すように添加法によりナトリウムを定量した。また、その値から他の純水中のナトリウム量を算出した。その結果を表 3.5 に示す。

この結果から、本実験では、ナトリウムが最も少ないイオン交換水を

表 3.7 測定条件
Analytical conditions.

	As	Te	Si	Ge
測定波長 Å	1,937	2,143	2,516	2,651
H. C. lamp 電流 mA	20	13	15	14
バ ー ナ	Hetco	Slit(I)	Slit(II)	Slit(II)
燃 料 H ₂ kg/cm ²	0.7			
C ₂ H ₂ l/min		3.8	3.8	3.8
助 燃 剤 N ₂ O l/min			5.0	5.0
Air kg/cm ²	1.0	1.5		

装 置 : N. J. A. AA-1 形

Hetco : High Efficiency Total Consumption Burner

Slit(I) : Slit Burner, Slit wide 0.6×100 mm

Slit(II) : Slit Burner, Slit wide 0.4×50 mm

蒸留したものを使用した。

シリコンウエハ、1枚(30 mmφ)を白金ざらにとり、5%ふっ(弗)酸 5 ml を加え加温してシリコン酸化膜を溶解する。酸化膜の溶解は、ウエハが溶液中に浮遊することで判別できる。溶液は、白金ざらのまま測定条件にセッした原子吸光装置により吸光度を測定し、検量線からナトリウムを算出する。本法により、シリコンウエハ 4 種について分析した結果を表 3.6 に示す。

本法は、シリコン酸化膜 1.0×10^{13} atom/cm² Na を定量することができる。また、定量下限は、溶液中 2 ppb Na であり、ナトリウムの汚染は十分検出することができた。しかし定量下限域での測定であり、精度をあげるためには、さらに使用純水および装置の改良について検討する必要がある。

3.2.2 カルコゲナイト ガラスの分析法

ガラス状スイッチング物質として、近年開発されているカルコゲナイトガラスは、EL display・logic circuit・モータ走査回路などその応用範囲が広い。このガラスの主成分であるひ素、テルル、シリコンおよびゲルマニウムの組成比は、スイッチング物質としての特性、寿命および安定性を左右するためきわめて重要である。

湿式分析法により、これらの元素を定量するには、操作が非常に煩雑となり困難である。そこで原子吸光法について検討した。

本実験における測定条件を表 3.7 に示す。

また、試料溶解に用いる酸の影響について検討した結果、As 200, Ge 400, Si 200 および Te 50 ppm に対し、硝酸は 0.7 N まで影響はない。さらにふっ酸 (HF 49%) は、測定溶液 50 ml に対して 0.5 ml 添加しても、各元素ともその影響は認められなかった。これは試料溶解に用いる酸濃度から考えて十分少量である。

共存元素の影響は、各元素とも 1,000 ppm までその影響がなかった。

カルコゲナイトガラスの分析法は次のとおりである。

細粉試料 (200 メッシュ以下) 約 0.2 g をテフロンビーカーにはかり、硝酸 (1+1) 5 ml を徐々に加え、さらにふっ酸 3~5 滴を滴下して完全に溶解する。この溶液に水 50 ml を加えて測定用試料液とし、シリコンおよびゲルマニウムを定量する。ひ素・テルルは、この溶液をさらに 10 倍に希釈して測定溶液とし、溶液を炎中に噴霧して吸光度を求め、検量線から濃度を算出する。なお、分析結果は組成比 (atomic %) で算出するため、試料は正確にはかる必要はない。検量線を図 3.5 に、また、成分組成既知の試料について分析した結果を表 3.8 に示す。本法は 5 種の試料を 8 時間で分析することができる。

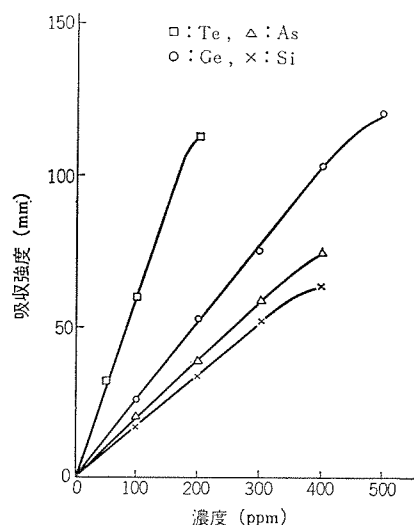


図 3.5 Te, As, Ge および Si の検量線
Calibration curve for Te, As, Ge and Si.

表 3.8 カルコゲナイトガラスの分析結果
Analytical results of chalcogenid glass.

	(atomic %)			
実 験 回 数	As	Te	Si	Ge
成 分 組 成	30.0	48.0	12.0	10.0
1	31.1	49.2	11.2	8.6
2	30.3	49.7	11.1	8.8
3	29.3	50.0	11.6	9.0
4	30.3	48.3	11.8	9.6
5	29.1	50.4	11.6	8.9
平 均 値	30.0	49.5	11.5	9.0
標 準 偏 差	0.82	0.81	0.32	0.38

3.3 その他の材料への応用

原子吸光分析法は、共存元素の干渉の少ないこと、および微量成分の分析に適していることから種々のランプ材料の分析に用いている。当社で発売されている BOC ランプは、発光管中に金属のハロゲン化物を添加したもので、筆者らは、このランプの開発改良に関して、種々の分析法を用いてランプ材料を分析した。原子吸光法では、ガラスの組成分析、発光管内の添加物などの分析を行なった。

また、けい光灯陰極材料として用いるトリプルカーボネート (カルシウム、バリウムおよびストロンチウムの炭酸塩) は、その成分元素がアルカリ土類であるため、相互分離が非常に困難である。そこで原子吸光法について検討し、亜酸化窒素-アセチレン炎を用いて良好な結果が得られた。

4. 公害分析への応用

工場排水、土壌および食物中の有害金属の定量法として、比色あるいはポーログラフ法に代わり、原子吸光法がよく用いられている。すでに工場排水中の有害金属の定量法として、JIS にも採用されている。これは原子吸光法が排水分析に対して、試料が溶液であるため直ちに測定できること、また、検出感度が高く選択性にすぐれているなど多くの利点があるからである。当社においても、種々の試料中の有害金属について分析するとともに、定量法についても検討した。

4.1 工場排水中のカドミウムの定量における分析法の比較

工場排水中のカドミウムの定量法として、JIS K 0102 に吸光度法、ポーログラフ法および原子吸光分析法が採用されている。これら分析法の精度と迅速性について比較した。

表 4.1 分析結果の比較
Comparison of analytical results.

(ppm)				
試料	測定回数	吸光度法	ポーログラフ法	原子吸光法
A	1	0.099	0.103	0.108
	2	0.100	0.100	0.112
	3	0.094	0.110	0.112
	4	0.101	0.100	0.108
	5	0.094	—	0.108
	平均値	0.098	0.103	0.110
	標準偏差	0.0034	0.0047	0.0022
B	変動係数 %	3.4	4.6	2.0
	1	0.042	0.058	0.047
	2	0.040	0.051	0.049
	平均値	0.041	0.054	0.048
C	1	0.54	0.44	0.50
	2	0.54	0.47	0.48
	平均値	0.54	0.46	0.49

検討用試料溶液は、工場排水にカドミウムを添加して作製した。また、分析方法はすべて JIS 法を準用した。これらの定量結果を表 4.1 に示した。

この結果から次のことがわかった。

(1) 分析法が異なれば、定量値に差を生じたが、各方法の相対誤差以内であることから有意の差ではない。

(2) 各方法とも、定量値の変動係数は 5 % 以下で精度はいずれもすぐれている。そのうち原子吸光法が最もよく、次で吸光度法、ポーログラフ法の順である。

(3) 分析所要時間は、吸光度法 2 時間、ポーログラフ法 10 時間に対して、原子吸光法は 20 分で測定することができる。

以上のことから、排水分析には原子吸光法が最も適していることが認められた。

4.2 米中のカドミウムの定量

イタイイタイ病の原因がカドミウムであることから、カドミウムは重大な環境汚染物質として注目されている。

米中のカドミウムの分析法は、すでに官報に告示され官報法に準じて分析しているが、前処理の方法あるいは定量法に関していくつかの方法がある。筆者らは、米中のカドミウムを定量するにあたって、これらの方法について検討した。その結果から次のことがわかった。

(1) 湿式灰化法として、種々の酸の組合せが用いられているが、硝酸・過塩素酸・硫酸 (100 : 40 : 10) による混酸の使用が試料を迅速に、しかも完全に分解する点ですぐれている。

(2) 低温灰化法は、試料の分解あるいは、事後の操作性においてすぐれているが、分解所要時間が長い欠点がある。

(3) 酸分解後の試料溶液中に硫酸を含む場合、溶液を直接炎中に噴霧したとき、溶液中の硫酸による分子吸収のため、高値となる傾向がある。したがって分解時の硫酸はできるだけ蒸発して除く必要がある。

(4) 標準添加法は、原理的には最も適した方法であるが、操作性が他の方法に劣る。

(5) 溶媒抽出法は、濃縮効果からカドミウムが非常に微量の場合には有効であるが、溶液中の未分解の有機物が有機相へ移り、測定時の誤差の原因となりやすい。したがって有機物は完全に分解する必要がある。なお、試薬として APDC または DDTC を用いても、MIBK で抽出した場合は定量結果に相違はない。これらの分析法による米中のカドミウムの分析結果を表 4.2 に示す。

この結果、どの分析方法も注意して操作すれば、定量結果はよく

表 4.2 米中のカドミウムの分析結果
Analytical results of cadmium in rice.

(ppm)					
試料 No.	溶媒抽出		標準添加法	直接測定	
	DDTC 法	APDC 法		湿式圧化	乾式低温圧化
1	2.23	2.44	2.30	2.45	2.45
2	1.45	1.60	1.76	1.60	1.57
3	0.50	—	0.75	0.75	—
4	0.61	—	0.44	0.42	—
5	0.28	—	0.24	0.25	—
6	—	0.16	0.18	0.28	—

(装置 N. J. A, AA-1, Air-H₂ 炎)

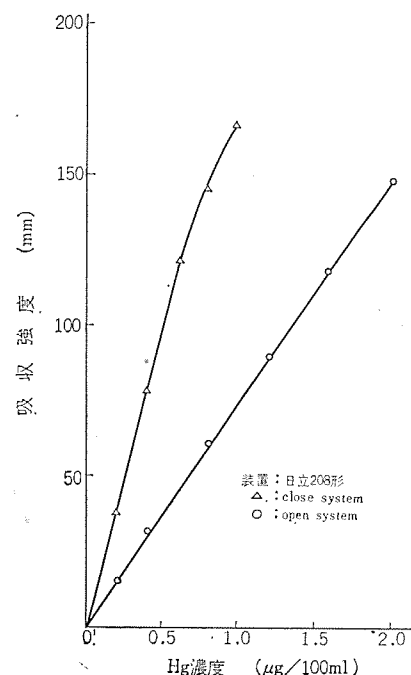


図 4.1 水銀の検量線の比較

Comparison of calibration curves for mercury.

一致するのでいずれの方法を用いてもよいと思われる。

4.3 フレームレス原子吸光法による水銀の定量

原子吸光法による水銀の定量で、通常のフレームを用いた場合、定量下限が約 0.2 ppm であり、排水基準から考えて不満足である。さらに溶液中の水銀の存在状態により、その感度が異なり誤差を生じやすい。近年、水銀の高感度分析法として、還元気化法によるフレームレス原子吸光法が考案され実用化している。筆者らは、排水中の水銀を分析するにあたって、これらの測定法について検討した。

フレームレス原子吸光法による水銀の定量法は、水銀に塩化第一すずを加えて金属水銀に還元し、この溶液に通気して水銀を気化し吸収セル中に導く。このセル中に H. C. Lamp から、水銀の輝線を通し、その吸光度を測定して定量する方法である。水銀蒸気の循環方式として、オープンおよびクローズシステムの二つの方式がある。両方法による検量線を図 4.1 に示す。

クローズシステムは感度は高いが、検量線の直線濃度範囲がせまく、また、循環させるためのポンプあるいは管壁に付着する水銀の損失も、その系が長くなるため、オープンシステムにくらべて多くなると思われる。さらに水銀を含む排水試料について、再現性を検討した結果、クローズシステムは平均相対誤差が 3.4 %、オープンシステムは 2.8 % であり、オープンシステムのほうが再現性もすぐれていた。

これらの水銀の測定法においてさらに問題となるのは、反応つら

表 4.3 水銀の定量結果
Analytical results of mercury.

実験番号	Hg 添加量 μg	Hg 測定値		回収率 %
		μg	ppb	
1	0	tr.	tr.	
2	0.4	0.40	4.0	100
3	0.4	0.35	3.5	88
4	0.4	0.36	3.6	90
5	0.4	0.37	3.7	93
6	0.4	0.38	3.8	95
平均値			3.7	
標準偏差			0.19	
7	1.0	1.11	11.1	111
8	1.0	1.06	11.6	106
9	1.0	1.13	11.3	113
10	1.0	1.05	10.5	105
11	1.0	1.00	10.0	100
平均値			10.7	
標準偏差			0.21	

(装置 日立 208 形)

スコ中の水分が、水蒸気となって吸収セル中に入り、光を散乱してみかけ上、吸収と同じ効果を示す。したがってこの系中に、乾燥剤あるいは冷却管を用いて水蒸気を捕集することが行なわれている。水分の完全除去という点では、乾燥剤を用いるほうがよいが、乾燥剤をしばしば交換しなければならないこと、塩素ガスは捕集されないなどの欠点がある。冷却管を用いた場合は、水分の完全除去に問題があり、前者にくらべて、ブランク値が高くなる傾向がある。しかし実際の測定においては、ブランク値を差し引いて補正し、ほとんど

問題とならない。排水中の水銀の定量結果を表 4.3 に示す。

5. む す び

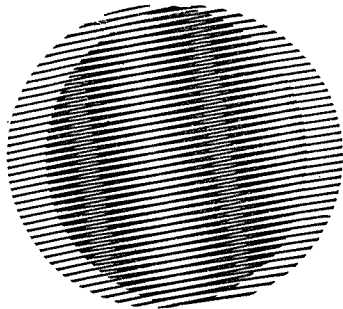
以上、原子吸光分析法について、当社における応用例と検討結果について報告した。本法は、金属を高感度で定量できること、また、操作が簡単であることなど多くの利点があり、日常分析機器として、今後ますます広範囲に利用されるものと考えられる。さらに微量金属の定量法として、長吸収管バーナ、フレームレスアトマイザ、原子けい光分析法など、装置の発展性も大きい。

公害分析においても、正当な環境調査をするためには、多くの試料について分析し、その分析結果から判断する必要がある、上にのべた利点から、本装置は最適な実用機器であると考えられる。

最後に、助言ならびに協力をいただいた関係諸氏に対し謝意を表します。
(昭和 47-5-24 受付)

参 考 文 献

- (1) W. Slavin : Atomic Absorption Spectroscopy, Wiley, New York (1968)
- (2) J. Ramirez-Muñoz : Atomic Absorption Spectroscopy, Analysis by Atomic Absorption Flam Photometry, Elsevier, Amsterdam (1968)
- (3) 武内, 鈴木 : 原子吸光分光分析, 南江堂 (昭 44)
- (4) 高木, 池田, 杉岡 : 三菱電機技報, 44, No. 7, 938 (昭 45)



新製品紹介

ダイヤロール新シリーズ

ダイヤロールは、制御箱と直流モートルおよび操作箱を組合せた当社のはん(汎)用サイリスタレオナードであるが、交流電源で手軽に可変速運転のできる小形モートルとして、発売以来各種産業分野で多数使用されている。このたびモートル部分のモデルチェンジを計るとともに、機種をいっそう充実させ、新シリーズとして発売した。新シリーズのおもな点は、

- (1) モートル部分をモデルチェンジし、大幅に小形化した(表1)。
- (2) 操作箱は当初5種類であったがさらに8種類を追加し、あらゆる用途に対応できるよう整備した(表2)。

表1 新シリーズ標準定格とわく番適用(防滴保護形)

標準出力 kW	標準回転速度 rpm	3,500	2,500	1,750	1,150
0.2		63	90 S	90 S	90 S
0.4		90 S	90 S	90 S	100 M
0.75		90 L	100 S	100 L	112 M
1.5		100 L	112 M	112 L	132 M
2.2		112 M	112 L	132 M	132 L
3.7		132 M	132 M	132 L	160 M
5.5		132 L	132 L	160 M	160 L
7.5		160 M	160 M	160 L	180 M

注) 太わく内は標準品 (5.5 kW 以上は三相全波方式)

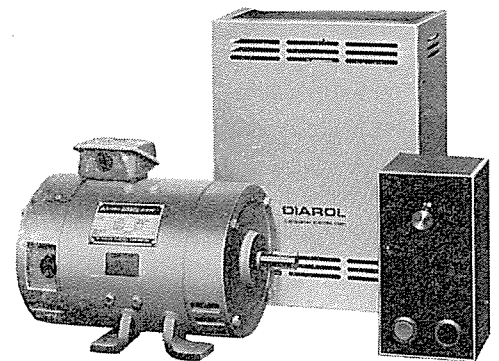


図1 ダイヤロール新シリーズ

表2 操作箱一覧

形式	名称	仕様および用途
DL-S	操作箱	起動・停止押しボタン・速度設定器を備えている。一般単独運転用
DL-M	電圧計付き操作箱	DL-S 形に電圧計を追加したもの
DL-T	3 速選択操作箱	DL-S 形に速度選択スイッチおよび外部信号により選択可能なリレーを追加したもの
DL-R	寸動可逆操作箱	DL-S 形に寸動、可逆運転用リレーを追加したもの
DL-C	クッションスタート箱	クッション(ソフト)スタート時間調整用つまみを備えている。他の操作箱とともに使用する。
DL-F	フィード箱	タコジェネフィードバック制御で使用するもの。速度変動が少なく高精度(±0.5~1%)が得られる。
DL-G	主速設定箱	複数台のダイヤロールを同一指令信号で運転する場合の主速を設定する。
DL-I	減速指令箱	速度指令を検出し、速度指令の変化に応じて、ダイナミックブレーキ用コンタクトを開閉する信号を出す。
DL-L	連動操作箱	他の機械の動きに連動させて運転する場合に制御出力信号をダイヤロールの速度指令に変換する。
DL-H	比率設定箱	複数台のダイヤロールをおのおの一定の速度比で運転する場合に DL-G と組合せて使用する。
DL-D	変位検出箱	機械的変位を電気信号に変換するもので、ダンサローラを用いた張力検出用などに使用する。
DL-A	ブリアンプ箱	調節計の信号をダイヤロールの制御信号に変換するための増幅器である。
DL-CB	傾斜信号箱	クッション起動、クッション停止を行なう。

新製品紹介

(3) 5.5kW 以上については、従来の単相全波サイリスタレオナード式のほかに三相全波方式も加えられた。

などであるが、新シリーズの最大の特長である新形モートルについて紹介する。

(1) 冷却方式の改善とラミネートヨーク方式の採用による整流能力の向上により、従来の同一出力のものに対し1～2わく番下げた。重量比では20～30%軽量化しており、据え付け・運搬とも大幅に改善された。

(2) すべてパイロット発電機(PG)の取り付けが可能であり、用途により取捨選択できる。

(3) 全わく番を通じて外観を統一し、また端子箱は電源がモートルの左右いずれにあっても、使用に差支えないようモートル上部に取り付けられている。しかもその向きは簡単に変わることができる。

これらの改良により、今後各方面でますますダイヤロールが利用されることを期待している。
[名古屋製作所]

もちつき機専用モータ

もちつき機は年間30～40万台生産され、農村・都会を問わず盛んな需要が見込まれている。

またもちつき機の容量も1.8～7.2l(1～4升)用と幅広くあるので、このたびこのもちつき機に使用するモータを専用化し、もちつき機専用モータとし開発、シリーズ化した。

■ もちつき機の種類

用 途	仕 様							
	モータの種類	出 力 W	極 P 数	電 圧 V	周 波 数 Hz	定格時間 h	絶縁階級	コンデンサ容 量 μF
1.8～3.6 l 用 (1～2 升)	SL 154 形 コンデンサモータ	150	4	100	50/60	1/2	E	25
3.6～5.4 l 用 (2～3 升)	SL 204 形 コンデンサモータ	200	4	100	50/60	1/4	E	45
5.4～7.2 l 用 (3～4 升)	SP-EV 形 分相始動モータ	200	4	100	50/60	1/2	E	—

■ 特 長

(1) 小形、軽量
ブラケットの鋼板化、フレームレスの構造とし、特別の専用設計により標準モートルよりも大幅に小形・軽量化。特に5.4～7.2l(3～4升)用のSP-EV形200W4Pを標準モートルと比較すれば図2のようになる。

(2) 安全設計
家庭などで使用されるため安全性には十分留意して設計されている。特にモータの通風穴は、モータ単体でも電気甲冑取締り法のテストフィンガが入らないような構造になっている。
[名古屋製作所]

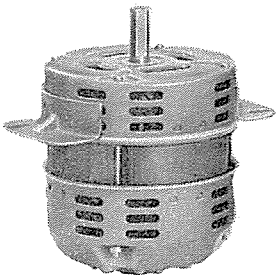


図 1 SP-EV 形 200 W 4 P

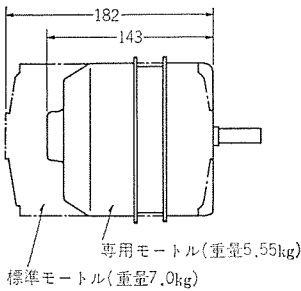
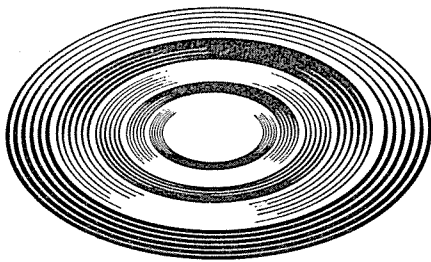


図 2 専用モートルと標準モートルの比較



NEWS FLASH

36 kV 用 限流形電力ヒューズの完成

三菱限流ヒューズの幅広い実績のうえに、このたびさらに 36 kV 用を新たに完成した。このヒューズには定格電流 100 A まであり、ヒューズリンクは屋内外ともに使用できる。

従来、このクラスには非限流ほう(礬)酸消弧方式で、対称しゃ断容量 1,000 MVA の DBA 形があったが、今回完成したものは、しゃ断容量が 2,500 MVA と大きく、消弧ガスの放出もなく、すぐれた限流特性をもった密閉限流形の電力ヒューズである。

用途は、36 kV 回路の一般変圧器・PT・ケーブルなどの保護用で、限流効果が有効に利用できる。

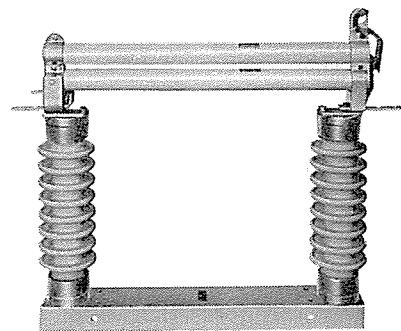
■ 特 長

- (1) 小形ながら大きなしゃ断容量をもつ
- (2) すぐれた限流特性が利用できる
- (3) しゃ断時にガスの放出がない密閉形である

■ おもな仕様

- | | |
|-------------------|--|
| (1) 形 名 | CL 形 |
| (2) 定格電流 | AC 36 kV |
| (3) ヒューズリンクの定格電流 | 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100(A)
(60~100 A はヒューズリンク 2 本並列使用) |
| (4) 定格しゃ断容量(三相对称) | 2,500 MVA |
| (5) ヒューズリンクの取り付け | 屋内外とも取り付け可 |
| (6) 支持台 | 断路形 |

[伊丹製作所]



地下鉄丸の内線 戸閉保安装置用 速度検出器

このたび地下鉄東西線(46年10月納入)にひきつづいて、帝都高速度交通営団地下鉄丸の内線電車用として戸閉保安装置用速度検出器を納入した。

車両運転においては、運転の保安には ATC・ATS 等が用いられて十分な対策が施されている。しかし、これ以外にも運転に関連した操作としてドアの開閉操作がある。

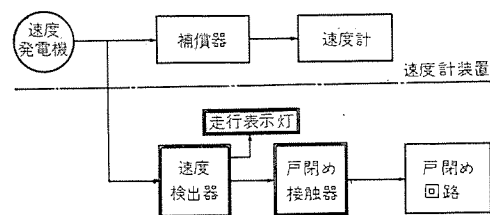
本装置は、これに対する保安装置で走行中はドア開閉スイッチをロックし、誤ってドアを開ける操作を行なってもドアが開かないようにするもので、停止状態のときのみ開けられるようになっている。

■ 特 長

- (1) 制御回路はトランジスタを主素子としている。
- (2) 速度検出のための入力信号は速度計用速度発電機出力を共用できる。
- (3) 床下取付け構造である。
- (4) 保守しやすいように制御回路の点検、取りはずしが容易である。

■ 仕 様

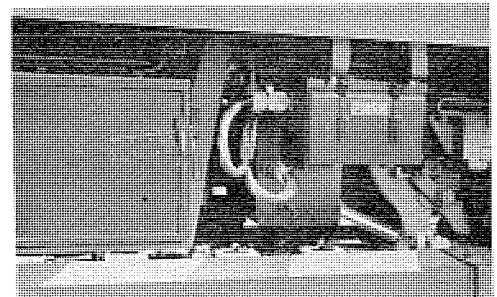
- | | |
|----------|-----------------------|
| (1) 速度入力 | 0~90 km/h, 5 km/h 3 V |
| (2) 出 力 | リレー接点(停止時励磁) |



戸閉め保安装置構成(例)

- (3) 電 源 DC 36 V \pm 10% 0.4 A 以下
- (4) 検出速度 5 km/h
- (5) 周囲温度 -10 \sim +40 $^{\circ}$ C

[鎌倉製作所]



地下鉄丸の内線用戸閉保安装置

羽越・白新線列車ダイヤ自動記録装置

このたび日本国有鉄道 羽越・白新線 CTC 用列車ダイヤ自動記録装置を納入した。

今回の装置の特長としては、1 点当たりの記録幅を従来の 2.5 mm/1 点または 1.75 mm/1 点から 1.25 mm/1 点と小さくし、直線性をよくして見やすくしたことである。記録方式は駅前後情報を実情報として CTC 装置より受け、これをもとに発生させた模擬信号により駅間の記録を行なう間接記録式である。

■ 構 成

入力制御機	1 台
制御機	1 台
記録機	1 台

■ 仕 様

駅間記録方式	間接記録式	
入力制御機	時 素	60 秒/1 点
制御機	情報点容量	200 点
	システム実装数	1 システム
記録機	有効記録幅	250 mm
	記録点容量	200 点
	紙送り速度	1 mm/1 分
使用記録紙	有効記録幅	250 mm
	時間目盛	2 分目
	1 枚/1 日	予定ダイヤ印刷

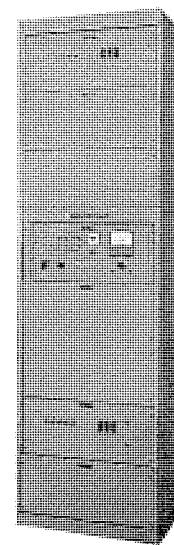


図 1 入力制御機（上部）
制御機（下部）

[鎌倉製作所]

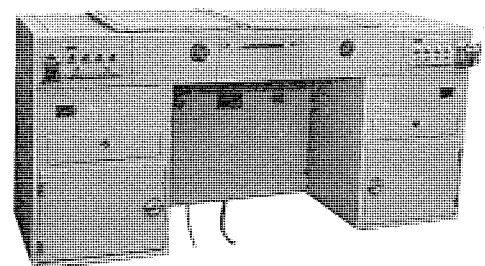


図 2 記録機

本社・営業所・研究所・製作所・工場所在地

本 社 東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル) (電) 100 (電) 東京 (03) 218局2111番

大阪営業所	大阪市北区梅田町8番地(西阪神ビル)(電)530	(電)大阪(06)343局1231番
名古屋営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)(電)450	(電)名古屋(052)565局3111番
静岡出張所	静岡市伝馬町16の3番地(明治生命静岡支社)(電)420	(電)静岡(0542)54局4681番
福岡営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル)(電)810	(電)福岡(092)72局2111番
長崎出張所	長崎市丸尾町7番8号(長崎底曳会館)(電)852	(電)長崎(0958)61局6101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル)(電)060-91	(電)札幌(011)261局9111番
仙台営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル)(電)980	(電)仙台(0222)21局1211番
富山営業所	富山市桜木町1番29号(電)930	(電)富山(0764)31局8211番
広島営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)(電)730	(電)広島(0822)47局5111番
岡山出張所	岡山市駅前町1丁目9番地(明治生命館)(電)700	(電)岡山(0862)25局5171番
高松営業所	高松市鶴屋町2番1号(電)760	(電)高松(0878)51局0001番
新潟営業所	新潟市東大通1丁目2番地23号(北陸ビル)(電)950	(電)新潟(0252)45局2151番
東京商品営業所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号(三菱電機ビル)(電)100	(電)東京(03)218局2111番
関東商品営業所	与野市上落合後原842番地(電)338	(電)与野(0488)33局3181番
大阪商品営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1(電)530	(電)大阪(06)344局1231番
名古屋商品営業所	名古屋市中村区広井町3丁目88番地(大名古屋ビル)(電)450	(電)名古屋(052)565局3111番
機器静岡営業所	静岡市小島2丁目1番22号(電)420	(電)静岡(0542)82局2061番
機器浜松営業所	浜松市上西町42の5(電)430	(電)浜松(0534)63局6121番
福岡商品営業所	福岡市中央区天神2丁目12番1号(天神ビル)(電)810	(電)福岡(092)72局2111番
札幌商品営業所	札幌市中央区北2条西4丁目1番地(北海道ビル)(電)060-91	(電)札幌(011)261局9111番
仙台商品営業所	仙台市大町1丁目1番30号(新仙台ビル)(電)980	(電)仙台(0222)21局1211番
北陸商品営業所	金沢市小坂町西97番地(電)920	(電)金沢(0762)52局1151番
広島商品営業所	広島市中町7番32号(日本生命ビル)(電)730	(電)広島(0822)47局5111番
高松商品営業所	高松市鶴屋町2番1号(電)760	(電)高松(0878)51局0001番
東京機器営業所	東京都港区北青山1丁目2番3号(青山ビル)(電)107	(電)東京(03)404局0336番
大阪機器営業所	大阪市北区堂島北町8番地の1(電)530	(電)大阪(06)344局1231番
中央研究所	尼崎市南清水字中野80番地(電)661	(電)大阪(06)491局8021番
生産技術研究所	尼崎市南清水字中野80番地(電)661	(電)大阪(06)491局8021番
商品研究所	鎌倉市大船2丁目14番40号(電)247	(電)鎌倉(0467)46局6111番
神戸製作所	神戸市兵庫区和田崎町3丁目10番地の1(電)652	(電)神戸(078)67局5041番
伊丹製作所	尼崎市南清水字中野80番地(電)661	(電)大阪(06)491局8021番
三田工場	三田市三輪町父々部85番地(電)669-13	(電)三田(07956)4371番
赤穂工場	赤穂市天和651番地(電)678-02	(電)赤穂(07914)3局2221番
長崎製作所	長崎市丸尾町6番14号(電)850-91	(電)長崎(0958)61局6211番
稲沢製作所	稲沢市菱町1番地(電)492	(電)稲沢(0587)32局8111番
和歌山製作所	和歌山市岡町91番地(電)640-91	(電)和歌山(0734)36局2111番
鎌倉製作所	鎌倉市上町屋325番地(電)247	(電)鎌倉(0467)44局1111番
通信機製作所	尼崎市南清水字中野80番地(電)661	(電)大阪(06)491局8021番
北伊丹製作所	伊丹市瑞原4丁目1番地(電)664	(電)伊丹(0727)82局5131番
熊本第一工場	熊本市竜田町弓削720番地(電)862	(電)熊本(0963)62局7211番
熊本第二工場	熊本県菊池郡西合志町御代志997(電)861-11	(電)熊本(09624)2局0151番
名古屋製作所	名古屋市中区矢田町18丁目1番地(電)4619	(電)名古屋(052)721局2111番
旭工場	尾張旭市下井町下井(電)488	(電)尾張旭(05615)3局5101番
福岡製作所	福岡市今宿青木690番地(電)819-01	(電)福岡今宿(09295)6局0431番
福山製作所	福山市緑町1番8号(電)720	(電)福山(0849)21局3211番
相模製作所	相模原市宮下1丁目1番57号(電)229	(電)相模原(0427)72局5131番
姫路製作所	姫路市千代田町840番地(電)670	(電)姫路(0792)23局1251番
静岡製作所	静岡市小島3丁目18番1号(電)420	(電)静岡(0542)85局1111番
中津川製作所	中津川市駒場町1番3号(電)508	(電)中津川(05736)6局2111番
大船製作所	鎌倉市大船5丁目1番1号(電)247	(電)鎌倉(0467)46局6111番
郡山製作所	郡山市栄町2番25号(電)963	(電)郡山(0249)32局1220番
群馬製作所	群馬県新田郡尾島町大字岩松800番地(電)370-04	(電)尾島(02765)2局1111番
藤岡工場	藤岡市本郷字別所1173番地(電)375	(電)藤岡(02742)2局1185番
京都製作所	京都府乙訓郡長岡町大字馬場小字図所1番地(電)617	(電)京都(075)921局4111番
長野工場	長野市大字南長池字村前(電)380	(電)長野(0262)27局1101番
札幌営業所	札幌市中央区北2条東12丁目98番地(電)050	(電)札幌(011)231局5544番
札幌工場		

マイクロ波 IC の進歩・縫製省力化特集

《特集論文》

- マイクロ波 IC の進歩特集号によせて
- マイクロ波 IC 製造技術の現状
- マイクロ波集積回路の設計法
- マイクロ波半導体デバイス
- マイクロ波 IC 用フェライト回路
- 準ミリ波 PCM 中継器におけるマイクロ波 IC

- ~~~~~
- 縫製工業における省力化の方向
 - 自動糸切り装置付きミシン
 - 自動止め縫い装置付きミシン
 - 専用ミシン・特殊ミシン・その他機器
 - リミストップGシリーズ
 - ミシン針定位置停止装置—

- ミシン用電動応用機
 - 縫製工場における空気清浄装置
- 《普通論文》
- MELCOM-7000 データマネジメントシステム (DMS)
 - 統計解析ソフトウェア (MSL)
 - パプア・ニューギニア政庁向け VHF/UHF 帯用小容量多重無線通信装置
 - アンテナ方位軸駆動輪の粘着特性
 - 東京都交通局納入三重系全 IC 化列車自動運転装置
 - ステンレス鋼 CBL 用プラズマアーク溶接機

三菱電機技報編集委員会

委員長	正 木 茂 雄	常任委員	湊 武 雄
副委員長	神 崎 邇	"	武 藤 正
常任委員	石 川 理 一	"	吉 松 誠 一
"	上 田 重 夫	委 員	北 垣 成 一
"	宇 佐 見 重 夫	"	武 田 忠 夫
"	北 川 和 人	"	田 附 和 夫
"	古 賀 亨	"	中 尾 致 一
"	塚 本 信 雄	"	南 日 達 郎
"	福 家 章	"	林 昇 寿
"	堀 謙 二 郎	"	待 鳥 正
"	牧 野 六 彦		

(以上 50 音順)

昭和 47 年 10 月 22 日印刷 昭和 47 年 10 月 25 日発行「禁無断転載」定価 1 部 金 200 円(送料別)

編集兼発行人

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号

正 木 茂 雄

印刷所

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地
(郵便番号 162)

大日本印刷株式会社

印刷者

東京都新宿区市谷加賀町 1 丁目 12 番地

高 橋 武 夫

発行所

東京都千代田区丸の内 2 丁目 2 番 3 号 (郵便番号 100)

三菱電機株式会社内

「三菱電機技報社」

(電話) (03) 218 局 2323 番

発売元

東京都千代田区神田錦町 3 丁目 1 番地 (郵便番号 101)

株式会社 オーム社書店

(電話) (03) 291 局 0912 番 振替口座 東京 20018 番